



MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E
DEI TRASPORTI



E.N.A.C.
ENTE NAZIONALE per L'AVIAZIONE
CIVILE

Committente Principale



AEROPORTO INTERNAZIONALE DI FIRENZE - "AMERIGO VESPUCCI"

Opera

PROJECT REVIEW - PIANO DI SVILUPPO AEROPORTUALE AL 2035

Titolo Documento Completo

OPERE IDRAULICHE ESTERNE - OIE
ASPETTI GEOLOGICI- Relazione geologica Opere Idrauliche
Esterne al Sedime

Livello di Progetto

SCHEDE DI APPROFONDIMENTO PROGETTUALE
A LIVELLO MINIMO DI PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

LIV PSA	REV 02	DATA EMISSIONE MARZO 2024	SCALA -	CODICE FILE COMPLETO FLR-MPL-PSA-OIE2-001-GL-RT_Rel Geo OIE
				TITOLO RIDOTTO Rel Geo OIE

02	03/2024	EMISSIONE PER PROCEDURA VIA-VAS	M. SANI	C.NALDI	L. TENERANI
01	03/2023	EMISSIONE PER APPROVAZIONE IN LINEA TECNICA DI ENAC	M.SANI	C.NALDI	L. TENERANI
00	10/2022	EMISSIONE PER DIBATTITO PUBBLICO	M.SANI	C.NALDI	L. TENERANI
REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

<p>COMMITTENTE PRINCIPALE</p>  <p>ACCOUNTABLE MANAGER Dott. Vittorio Fanti</p>	<p>GRUPPO DI PROGETTAZIONE</p>  <p>DIRETTORE TECNICO Ing. Lorenzo Tenerani Ordine degli Ingegneri di Massa Carrara n°631</p>	<p>SUPPORTI SPECIALISTICI</p>  <p>TERRA & OPERE S.R.L. SOCIETÀ D'INGEGNERIA CONSULENZE GEOLOGICHE</p> <p>SUPPORTO SPECIALISTICO Dott. Geol. Michele Sani Ordine dei Geologi della Toscana n°383</p>
<p>POST HOLDER PROGETTAZIONE Ing. Lorenzo Tenerani</p>	<p>RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Ing. Claudia Naldi Ordine degli Ingegneri di Firenze n. 7122</p>	
<p>POST HOLDER MANUTENZIONE Ing. Nicola D'Ippolito</p>		
<p>POST HOLDER AREA DI MOVIMENTO Geom. Luca Ermini</p>		

GRUPPO DI LAVORO

responsabile di commessa e coordinamento
dr. geol. Michele Sani

collaborazione
testi: dr. geol. Fabio Picchi
figure e tavole fuori testo: dr.geol. Paride Bigazzi

INDICE

1. Premessa.....	7
1.1. Generalità.....	7
1.2. Descrizione delle opere e degli interventi.....	8
1.3. Individuazione dei vincoli presenti.....	11
2. Fasi di lavoro.....	11
3. Geologia.....	12
3.1. Evoluzione tettonica del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia.....	12
3.2. Geologia e stratigrafia della Piana di Firenze.....	14
3.2.1. <i>Substrato pre-lacustre</i>	14
3.2.2. <i>Depositi pre-lacustri</i>	15
3.2.3. <i>Depositi lacustri e fluviali del bacino villafranchiano</i>	15
3.2.4. <i>Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia</i>	15
3.2.4.1. Argille turchine AUCTT.....	16
3.2.4.2. Depositi clastici di delta e fan-delta dei paleo-torrenti.....	16
3.2.5. <i>Sintema di Firenze (Depositi alluvionali antichi)</i>	16
3.2.6. <i>Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti)</i>	17
3.3. Orizzonti "Firenze".....	17
3.3.1. <i>Orizzonte "Firenze 1"</i>	17
3.3.2. <i>Orizzonte "Firenze 2"</i>	18
3.3.3. <i>Orizzonte "Firenze 3"</i>	19
3.3.4. <i>Orizzonte "Firenze 4"</i>	20
3.3.5. <i>Considerazioni sull'andamento degli orizzonti "Firenze"</i>	20
3.4. Geologia dell'area di intervento.....	22
3.4.1. <i>Depositi alluvionali recenti terrazzati e non terrazzati (bna)</i>	23
3.4.1.1. bna1 e bna2.....	23
3.4.2. <i>Depositi alluvionali attuali (b)</i>	23
3.4.3. <i>Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5)</i>	23
3.4.4. <i>Depositi antropici, discriche per inerti e rifiuti solidi [h1]</i>	24
4. Idrogeologia.....	24
4.1. Aspetti idrogeologici generali.....	24
4.2. Permeabilità delle unità litostratigrafiche affioranti nell'area in esame.....	25
4.3. Superficie piezometrica.....	27
5. Geomorfologia e stabilità.....	28
5.1. Introduzione.....	28
5.1.1. <i>Forme di origine antropica</i>	29
5.1.2. <i>Forme dovute e processi fluviali</i>	29
6. Classi di pericolosità.....	29
6.1. Pericolosità geologica.....	29
6.2. Pericolosità idraulica.....	29
6.3. Pericolosità sismica.....	30
7. Classi di fattibilità.....	30
7.1. Comune di Sesto Fiorentino.....	30
7.1.1. <i>Fattibilità geologica</i>	30
7.1.2. <i>Fattibilità idraulica</i>	30
7.1.3. <i>Fattibilità sismica</i>	31
8. Risultati delle indagini eseguite.....	31
8.1. Generalità.....	31
8.2. Prove penetrometriche.....	37

8.2.1. Prove penetrometriche statiche (CPT).....	37
8.2.2. Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU).....	45
8.3. Sondaggi a carotaggio continuo.....	60
8.3.1. Standard Penetration Test.....	60
8.4. Prove geotecniche di laboratorio.....	60
8.5. Indagini geofisiche.....	64
8.5.1. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW).....	64
8.5.2. Sismica a rifrazione.....	64
8.5.3. Indagine sismica in foro downhole.....	65
8.5.4. Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR).....	66
9. Sismicità e definizione dei parametri sismici.....	67
9.1. Zona sismica.....	67
9.2. Parametri sismici.....	67
9.2.1. Aspetti generali.....	67
9.2.2. Categoria di di sottosuolo (approccio semplificato).....	68
9.2.3. Categoria topografica.....	68
9.2.4. Parametri dell'azione sismica locale.....	68
9.2.4.1. Parametri dell'azione sismica locale (Fosso Reale).....	69
9.2.4.2. Parametri dell'azione sismica locale (Nuovo Canale di Gronda).....	72
9.2.4.3. Parametri dell'azione sismica locale (Nuovo Canale Lupaia Giunchi).....	74
9.2.4.4. Parametri dell'azione sismica locale (Collettore fognario sottopista).....	77
9.2.4.5. Parametri dell'azione sismica locale (Collettore cassa orientale).....	81
10. Modellazione geologica, geotecnica e liquefazione (Fosso Reale).....	86
10.1. Modello geologico del sottosuolo.....	86
10.2. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni presenti nel volume significativo e definizione del modello geotecnico di sottosuolo.....	87
10.2.1. Aspetti generali.....	87
10.2.2. Modello geotecnico.....	88
10.2.2.1. Tratto di nuova inalveazione del Fosso Reale (a nord della nuova pista) e area di laminazione B.....	88
10.2.2.2. Area di laminazione A.....	88
10.2.2.3. Derivazione del Fosso Reale.....	89
10.2.2.4. Tratto di nuova inalveazione del Fosso Reale (tra nuova pista e A11).....	89
10.2.3. Considerazioni sui terreni coesivi superficiali.....	90
10.3. Liquefazione.....	91
11. Modellazione geologica, geotecnica e liquefazione (Nuovo Canale di Gronda).....	94
11.1. Modello geologico del sottosuolo.....	94
11.2. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni presenti nel volume significativo e definizione del modello geotecnico di sottosuolo.....	94
11.2.1. Aspetti generali.....	94
11.2.2. Modello geotecnico.....	95
11.2.2.1. Considerazioni sui terreni coesivi superficiali.....	96
11.3. Liquefazione.....	96
12. Modellazione geologica, geotecnica e liquefazione (Nuovo Canale Lupaia Giunchi e Collettore per scarico Cassa Orientale).....	97
12.1. Modello geologico del sottosuolo.....	97
12.2. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni presenti nel volume significativo e definizione del modello geotecnico di sottosuolo.....	98
12.2.1. Aspetti generali.....	98
12.2.2. Modello geotecnico.....	99
12.2.2.1. Modello geotecnico.....	99

12.3. Liquefazione.....	100
13. Modellazione geologica, geotecnica e liquefazione (Collettore sotto la pista).....	101
13.1. Modello geologico del sottosuolo.....	101
13.2. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni presenti nel volume significativo e definizione del modello geotecnico di sottosuolo.....	102
13.2.1. Aspetti generali.....	102
13.2.2. Modello geotecnico.....	102
13.2.2.1. Modello geotecnico.....	102
13.3. Liquefazione.....	103
14. Terre e rocce da scavo.....	104
15. Indicazioni relative alla realizzazione dei lavori.....	104
15.1. Indicazioni inerenti la gestione delle acque di aggettamento.....	104
15.2. Indicazioni sulla necessità di opere provvisoriale e loro tipologia.....	105
15.3. Indicazione sulla tutela dei suoli interessati dalle aree di cantiere.....	105
15.4. Indicazione degli interventi di ripristino delle aree a fine cantiere.....	105
16. Conclusioni.....	105
17. Bibliografia.....	107

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Ubicazione delle aree di progetto in scala 1:10.000.	10
Figura 2 - <i>Orizzonti stratigrafici presenti nel sottosuolo dell'area di Firenze (estratto da Capecci et al., 1976b).</i>	18
Figura 3 - Valori della pressione di preconsolidazione ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno delle aree oggetto della presente relazione, con i campioni posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico)	92
Figura 4 - Valori di OCR ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno delle aree di intervento, con i campioni posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico)	92
Figura 5 - Valori di OCR in funzione della profondità di prelievo (m dal p.c.), ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni dei sondaggi a disposizione per la presente relazione geologica.	93

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Classi di permeabilità.	26
Tabella 2 - Misure piezometriche (04/09/2017).	28
Tabella 3 - Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite durante la perforazione dei sondaggi.	33
Tabella 4 - Campioni indisturbati della campagna del 2015.	34
Tabella 5 - Campioni indisturbati della campagna del 2017.	37
Tabella 6- Parametri geotecnici ricavabili dai valori di N_{SPT}	61
Tabella 7 - Prove geotecniche di laboratorio "specifiche" eseguite sui campioni indisturbati del 2015. ...	62
Tabella 8 - Prove geotecniche di laboratorio "specifiche" eseguite sui campioni indisturbati del 2017. ...	63
Tabella 9 - Valori $V_{s_{eq}}$	64
Tabella 10 - Valori $V_{s_{eq}}$	66
Tabella 11 - Parametri statistici dei parametri dalle prove edometriche.	91
Tabella 12- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.	93
Tabella 13 - Valori caratteristici per l'area di intervento.	95
Tabella 14- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.	97

Tabella 15 - Valori caratteristici per l'area di intervento relativamente alla pista.	99
Tabella 16- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.	101
Tabella 17 - Valori caratteristici per l'area di intervento.	103
Tabella 18- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.	104

ELABORATI FUORI TESTO

Allegato A – Stratigrafie sondaggi e prove di laboratorio
Allegato B – Prove penetrometriche statiche (CPT) e con piezocono (CPTU)
Allegato C – Indagini sismiche
Carta geologica
Carta idrogeologica
Carta geomorfologica
Ubicazione delle indagini

* * *

1. Premessa

1.1. Generalità

Il presente documento costituisce la Relazione Geologica dell'intervento relativo alle opere idrauliche esterne al sedime, ubicate nel Comune di Sesto Fiorentino (Provincia di Firenze - figura 1), parte integrante della Project Review del Piano di Sviluppo Aeroportuale (o Masterplan) al 2035 dell'aeroporto di Firenze, qui sviluppata e dettagliata ad un livello tecnico ritenuto congruo con le finalità della presente fase procedurale, comunque non inferiore a quello del progetto di fattibilità tecnica ed economica di cui all'art. 41 del D. Lgs. n. 36/2023.

Il citato approfondimento tecnico viene previsto ad integrazione della Sezione Generale della Project Review del Piano di Sviluppo Aeroportuale al 2035, predisposta in aderenza alle normative e/o regolamenti specifici del settore aeronautico, rispetto alla quale si pone l'obiettivo di elaborare ulteriori elementi tecnici di studio, dettaglio, analisi e progettazione, ritenuti necessari ai fini del compiuto espletamento dei procedimenti amministrativi (di compatibilità ambientale e di autorizzazione) ai quali risulta per legge assoggettato lo strumento del Piano di Sviluppo Aeroportuale, così integrato in modo da rafforzarne la valenza e la funzione progettuale, strettamente interconnessa con quella pianificatoria e programmatica di investimento. Le informazioni di seguito riportate vanno, pertanto, analizzate in stretta correlazione rispetto ai più ampi ed estesi aspetti tecnico-economici trattati all'interno dei documenti afferenti alla Sezione Generale del Masterplan, con i quali esse si relazionano secondo un processo capillare di progressivo approfondimento e dettaglio, ritenuto utile per una più completa, consapevole e piena visione dell'insieme delle previsioni di trasformazione dello scalo aeroportuale e delle aree circostanti, e per una più esauriente analisi e comprensione della Project Review del Piano di Sviluppo Aeroportuale. La citata Project Review costituisce la nuova formulazione tecnica delle previsioni progettuali e di investimento che ENAC prevede di attuare, nel medio-lungo periodo (orizzonte 2035, coerente con quello del Piano Nazionale degli Aeroporti in fase di aggiornamento), relativamente all'infrastruttura aeroportuale di Firenze, redatta dal Gestore aeroportuale di intesa con l'Ente regolatore in attuazione degli obblighi di miglioramento, ottimizzazione e sviluppo dell'aeroporto insiti nel contratto di concessione che lega lo stesso Gestore alle Istituzioni dello Stato (Ministero delle Infrastrutture e ENAC) per la gestione totale dell'infrastruttura

aeroportuale (bene dello Stato). Ne consegue che l'insieme documentale di cui la presente relazione costituisce parte integrante deve essere visto e analizzato nella propria autonomia e indipendenza sostanziale, per quanto inevitabilmente consequenziale rispetto al precedente Masterplan 2014-2029 col quale risultano ancora sussistenti più elementi di dialogo che, tuttavia, ci si pone l'obiettivo di non assurgere a valenza prodromica e a funzionalità necessaria per una completa illustrazione, definizione e comprensione del nuovo Piano di Sviluppo Aeroportuale 2035. Si auspica, infine, di aver esaurientemente e correttamente tradotto e trasferito, all'interno della documentazione di cui al nuovo Masterplan 2035, quel prezioso bagaglio di esperienza e quell'insieme di utili risultanze derivanti dal dialogo costruttivo e dialettico che, nell'ultimo decennio, ha visto in più momenti la partecipazione di ENAC, del Gestore aeroportuale, degli Enti/Amministrazioni interessati, delle Istituzioni nazionali e regionali, dei vari stakeholders e della cittadinanza attiva intorno ai temi relativi al trasporto aereo, alla multimodalità della mobilità, al ruolo della rete aeroportuale territoriale toscana e al futuro dello scalo aeroportuale di Firenze, che ENAC vede sempre più strategico, integrato e funzionale alla rete nazionale ed europea dei trasporti.

Il presente studio descrive le caratteristiche geologiche (litologiche e giaciture), idrogeologiche, idrauliche, geomorfologiche e di stabilità, di pericolosità (geologica, idraulica e sismica) dell'area in oggetto, riassume i risultati delle indagini geognostiche eseguite nel 2015 e nel 2017 per le due fasi della *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci, determina le classi di fattibilità dell'intervento (geologica, idraulica e sismica), e contiene la modellazione geologica, geotecnica e sismica del terreno.

1.2. Descrizione delle opere e degli interventi

La presente relazione geologica preliminare ha come oggetto i seguenti interventi principali previsti dalla configurazione di progetto delle opere idrauliche esterne al sedime aeroportuale:

- tratto di nuova inalveazione del Fosso Reale (a nord della nuova pista in progetto) che, all'altezza dello stabilimento Baxter di Via dell'Osmannoro, devierà verso ovest, scorrendo parallelamente al nuovo sedime aeroportuale e dividendosi in due rami (uno dedicato alle portate di importante ed uno a quelle ordinarie e di magra) a sud-est della Stazione di

- Servizio di Peretola presente lungo l'autostrada A11. Il canale di magra confluirà nell'esistente alveo del Fosso Reale in corrispondenza dell'area di Case Passerini, mentre il ramo principale circuiterà la pista e si immetterà nell'esistente alveo del Fosso Reale immediatamente a monte dell'attuale ponte autostradale;
- area di laminazione denominata A, ubicata all'estremità ovest del sedime aeroportuale in sponda destra del Fosso Reale; la cassa avrà una superficie di circa 13 ha (argini compresi) ed una capacità di invaso pari a circa 464.000 mc;
 - area di laminazione denominata B, che si estende sulla sinistra idraulica del nuovo tracciato del Fosso Reale, nel primo tratto a valle della deviazione; la cassa si estenderà su circa 10 ha (argini compresi), con una capacità d'invaso è di circa 250.000 mc;
 - nuovo Canale di Gronda che, partendo all'altezza dello stabilimento Baxter Manufacturing SpA di Via dell'Osmannoro, scorrerà verso ovest parallelamente alla futura area aeroportuale, in adiacenza al nuovo tracciato del Fosso Reale, aggirando la cassa di laminazione A e proseguendo poi verso sud per ricongiungersi all'alveo esistente del Fosso Reale nei pressi di Case Passerini;
 - nuovo Canale Lupaia-Giunchi che scorre parallelamente al lato nord della nuova pista, dalla parte sud-orientale della duna antirumore fino a circa l'area nella quale sarà situato il nuovo sottopasso viario alla pista di volo;
 - collettore per scarico cassa orientale che, collegandosi al Fosso Reale a nord, circuita internamente (lato Polo Scientifico) la duna antirumore per giungere alla Cassa Orientale a sud-est;
 - collettore fognario che sottopassa la pista, il quale partendo da una quota di imposta di 33,10 m s.l.m. (circa 5,50 m di profondità dal piano di campagna attuale) in corrispondenza della duna anti rumore, si immetterà nella vasca di autocontenimento C;
 - risagomatura/adequamento dune in terra esistenti lungo A11.

Per ulteriori dettagli si rimanda alla *Relazione idrologica-idraulica* e ai relativi elaborati progettuali. Vista la tipologia delle opere previste, il progetto non è identificabile dalle classi d'indagine di cui al Decreto del Presidente della Giunta Regionale 19 gennaio 2022 n. 1/R¹ il quale non risulta quindi applicabile.

¹ *Regolamento di attuazione dell'articolo 181 della legge regionale 10 novembre 2014 n. 65 (Norme per il governo del territorio). Disciplina sulle modalità di svolgimento delle attività di vigilanza e verifica delle opere e delle costruzioni in zone soggette a rischio sismico.*

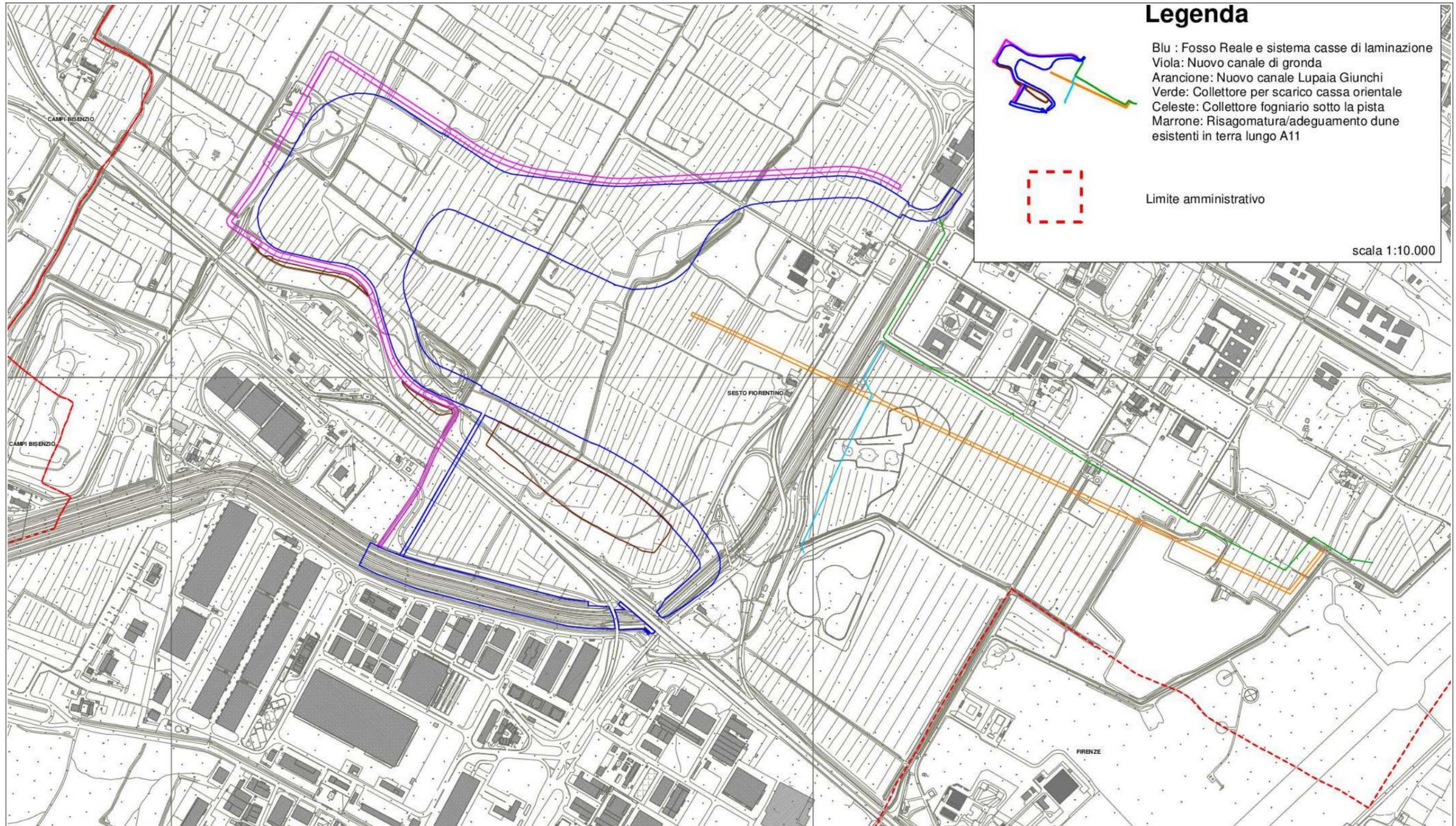


Figura 1 - Ubicazione delle aree di progetto in scala 1:10.000.

1.3. Individuazione dei vincoli presenti

L'area in cui saranno realizzati gli interventi in progetto dal punto della presenza dei principali vincoli territoriali presenta attualmente la seguente situazione:

- l'area di progetto non è interessata dal Vincolo Idrogeologico ai sensi del Regio Decreto Legge n. 3267 del 30 dicembre 1923, mentre risulta interessata dal Vincolo Idrogeologico determinato dalla presenza di una fascia di vegetazione ripariale attorno al Lago di Peretola (com a 1 dell'art. 37 della L.R. 39/2000) e lungo gli argini del Fosso Reale;
- la porzione nord occidentale dell'area in progetto ricade all'interno del Sito di Interesse Regionale (SIR) *Stagni della Piana Fiorentina* (codice IT5120001) e dell'Area Protette di interesse locale *A.N.P.I.L. di Podere la Querciola*;
- la porzione occidentale e sud-occidentale dell'area in oggetto è ubicata all'interno di un'area di notevole interesse pubblico ex art. 136, lettera a, Decreto Legislativo 22 gennaio 2004 n. 42²;
- la parte meridionale dell'area è parzialmente interna al Vincolo aeroportuale (Fascia di rispetto perimetrale m. 300 pendenza 1/7);
- i territori contermini ai laghi (lettera b, comma 1, art. 142 del D.Lgs. 42/2004) in particolare l'area attorno al Lago di Peretola e quella limitrofa agli Stagni di Focognano;
- i territori coperti da foreste e da boschi (lettera g, comma 1, art. 142 del D.Lgs. 42/2004) per la fascia ripariale del Lago di Peretola e le fasce lungo le sponde del Fosso Reale;
- zone gravate da usi civici (lettera h, comma 1, art. 142 del D.Lgs. 42/2004).

2. Fasi di lavoro

La presente relazione geologica è stata articolata nelle seguenti fasi di lavoro:

- consultazione delle *Indagini geologico-tecniche* di supporto al Piano Strutturale intercomunale Calenzano e Sesto Fiorentino e al Secondo Regolamento Urbanistico del Comune di Sesto Fiorentino;
- presa visione del Piano di Bacino del Fiume Arno – Stralcio Assetto idrogeologico (PAI - Norme di attuazione ed allegati) redatto dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale;

² *Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137, aggiornamento del quadro conoscitivo con deliberazione n. 46 del 23 luglio 2019.*

- presa visione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) redatto dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale;
- esecuzione di alcuni sopralluoghi sul posto e nelle aree immediatamente limitrofe, per prendere visione della situazione attuale, per la comprensione della situazione geomorfologica e della stabilità generale del sito;
- attribuzione della fattibilità agli interventi in progetto dal punto di vista geologico, idraulico e sismico (si veda il § 7);
- utilizzo delle indagini geognostiche che costituiscono la *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci (vecchio Master Plan 2014-2029) eseguite dalla società Ambiente sc di Carrara, su incarico di Toscana Aeroporti Engineering S.r.l., nel 2015 e nel 2017;
- analisi dei risultati delle indagini geognostiche a disposizione per la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica dei terreni di fondazione (si veda il § 8);
- definizione della categoria di sottosuolo secondo l'approccio semplificato ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 (si veda il § 9.1)
- determinazione dei parametri sismici (si veda § 9.2);
- elaborazione del modello geologico del sito e del modello geotecnico di sottosuolo (§ 10);
- indicazione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici ricavati (§ 10.2.1);
- valutazioni in merito alla suscettibilità dei terreni nei confronti della liquefazione (§ 10.3).

3. Geologia

3.1. Evoluzione tettonica del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia

Il bacino di Firenze-Prato-Pistoia, posto ad una quota media di 45 m s.l.m., si sviluppa in direzione NW-SE per una lunghezza di 45 km ed una larghezza massima di circa 10 km. Esso è delimitato a nord-nord-est dai Monti della Calvana e dal Monte Morello, con altitudine di circa 900 m s.l.m. e a sud-sudovest dal Montalbano con altitudine di oltre 600 m s.l.m.. In questo contesto geografico è prevista la realizzazione della nuova pista, delle opere accessorie e di quelle di compensazione dell'Aeroporto Internazionale Amerigo Vespucci di Firenze. Il bacino di Firenze-Prato-Pistoia presenta una geometria a semi-graben fortemente asimmetrica, con un

marginale nord-orientale molto acclive, in corrispondenza della faglia principale di Fiesole e da una rampa di raccordo poco inclinata localmente interessata da faglie minori sul versante sud-occidentale. I depositi di riempimento del bacino si sono sviluppati con ampi delta e fan-delta clastici sviluppati alla base del sistema di faglie maggiori. In questo tipo di bacini il sollevamento tettonico dei margini, e il corrispondente allargamento del drenaggio fluviale, portano alla formazione di potenti sequenze sedimentarie clastiche grossolane in corrispondenza delle aree centrali. Nel dettaglio, dal punto di vista tettonico-geometrico, l'area di Firenze è caratterizzata dalla presenza di una fascia interessata da più faglie disposte a gradinata e in parte sepolte al di sotto dei depositi fluvio-lacustri villafranchiani, localizzata nell'area pedemontana a nord della pianura di Firenze, e dalla presenza delle faglie sepolte Castello-Scandicci e Maiano-Bagno a Ripoli che interessano il substrato pre-lacustre, trasversalmente al bacino. Le faglie controllano la morfologia dell'area fiorentina determinando, rispetto al basso morfologico-strutturale della pianura di Firenze, l'alto delle colline di Castello-Trespiano-Fiesole nel settore settentrionale, e delle colline di Bellosguardo-Arcetri-S.Miniato a Monte a sud della città. L'area fiorentina risulta quindi delimitata a nord da lineamenti tettonici paralleli con direzione NNO-SSE, che hanno giocato come faglie a movimento verticale distensivo determinando lo sviluppo del bacino fluvio-lacustre con il ribassamento del blocco meridionale. La principale attività delle faglie è riferita a un periodo anteriore al Pliocene inferiore, periodo in cui si è determinato il maggiore movimento verticale; successivamente si è registrata una ripresa di movimenti al tetto del Pliocene inferiore, a cui è associato il movimento verticale responsabile dell'origine della depressione lacustre, e un'ultima pulsazione al termine del Villafranchiano, che ha determinato il sollevamento del blocco di Firenze rispetto al resto del lago e ha stabilito i rapporti tettonico-geometrici attuali. La master fault, a cui viene attribuito il principale movimento verticale, è manifestata da una scarpata tettonica che ha determinato lo sviluppo dei ripidi versanti meridionali delle colline di Castello-Monte Rinaldi-Fiesole; in realtà si tratta di una zona interessata da varie faglie disposte a gradinata, di cui solo la più orientale affiora con la scarpata degradata dei versanti di Fiesole, mentre le altre sono sepolte sotto i depositi villafranchiani di San Domenico, o addirittura sotto l'area delle Cure-Campo di Marte. Tali faglie sono dislocate da lineamenti tettonici trasversali che interessano il substrato con generali direzioni NNE-SSO, e il cui movimento risulta prevalentemente verticale distensivo. Le faglie a carattere prevalentemente distensivo, di

Castello-Scandicci a ovest e di Maiano-Bagno a Ripoli a est, sono risultate attive a più riprese a partire dal Pliocene inferiore, giocando successivamente, verso la fine del Villafranchiano, un ruolo determinante per il sollevamento dell'area fiorentina rispetto al restante bacino lacustre. Questi elementi strutturali hanno sollevato la pianura di Firenze, ribassando il blocco a NO nel caso della faglia occidentale, e il blocco a SE per la faglia orientale con un rigetto globale stimabile in alcune centinaia di metri. Nel Villafranchiano sono state documentate due fasi tettoniche lungo tali lineamenti, probabilmente in regime compressivo, in accordo con evidenze regionali. Nella zona nord-orientale dell'area fiorentina lungo le colline di Fiesole-Monte Rinaldi, il motivo strutturale è dato da una piega anticlinale con asse orientato NO-SE, delimitato a SO dalla omonima zona di faglia che mette in contatto le arenarie torbiditiche del Macigno con i depositi recenti fluvio-lacustri; la struttura è interessata da faglie minori ad andamento NE-SO e prevalente movimento verticale. L'assetto tettonico delle Unità Liguri affioranti a NO di Firenze e nell'area meridionale è dato da una blanda monoclinale immergente in genere verso N-NE di valori medi ($<40^\circ$). I depositi lacustri Villafranchiani risultano dislocati dalle faglie sinsedimentarie trasversali al bacino, ma mantengono una giacitura sub-orizzontale su entrambi i blocchi dislocati; i depositi alluvionali recenti e attuali sono ancora in giacitura primaria. Per nessuna delle faglie presenti nella zona ci sono indizi geologici di attività tettonica più recente di circa 500.000 anni.

3.2. Geologia e stratigrafia della Piana di Firenze

Il sottosuolo della piana di Firenze è costituito da sedimenti plio-quadernari di riempimento del bacino fluvio-lacustre formatosi a seguito della fase tettonica distensiva, depositi sulle rocce del paleoinvaso. Nei paragrafi seguenti si descrivono le unità litostratigrafiche presenti, a partire dai terreni più antichi.

3.2.1. Substrato pre-lacustre

Il substrato pre-lacustre è costituito da rocce appartenenti alle Unità Liguri, ed è composto, in particolare, dai calcari marnosi, dalle calcareniti e dalle argilliti della Formazione di Sillano e dalle arenarie calcaree e dalle argilliti rosse della Formazione della Pietraforte. Il tetto del substrato pre-pliocenico risulta a profondità contenute in corrispondenza del centro storico di Firenze (profondità inferiori a 20 m dal piano di campagna). Il corso del Fiume Arno spostato verso il bordo meridionale del bacino ha portato il fiume a erodere le rocce liguri,

creando un terrazzo di erosione lungo tutto il margine meridionale cittadino da est ad ovest. L'attività tettonica collegata alla faglia trasversale Castello-Scandicci ha ribassato di un centinaio di metri il tetto del substrato subito a ovest della linea di faglia, ma l'abbassamento si spinge fino alla profondità di 600 m in corrispondenza della piana di Campi Bisenzio-Sesto Fiorentino. Nelle zone nord-orientali della città il substrato è stato dislocato in modo differenziale dalle faglie trasversali e longitudinali, ed è possibile trovarlo a profondità superiori a 110 m, mentre nelle aree sudorientali l'abbassamento ha avuto minore intensità.

3.2.2. Depositi pre-lacustri

Nel periodo compreso tra il Miocene superiore e il Pliocene inferiore si sono deposti:

- sedimenti pre-lacustri di ambiente fluviale (Depositi del paleo-Mugnone) quando la linea di costa era prossima all'attuale zona di San Casciano Val di Pesa;
- sedimenti residuali delle deposizioni limno-palustri in aree di limitata estensione.

3.2.3. Depositi lacustri e fluviali del bacino villafranchiano

Nell'area interessata dal presente studio si hanno i seguenti complessi sedimentari andando dal più antico e seguendo la classificazione UBSU (*Unconformity-bounded Stratigraphic Units*):

- Sintema del bacino di Firenze-Prato-Pistoia;
- Sintema di Firenze (depositi antichi);
- Sintema dell'Arno (depositi alluvionali recenti).

Con il termine *sintema* si identifica un corpo sedimentario di origine comune definito alla base e al tetto da superfici di discontinuità o da superfici topografiche. Dal punto di vista sedimentologico il Sintema del bacino di Firenze-Prato-Pistoia è ascrivibile ad ambienti lacustri, lacustri-palustri e di fan-delta, il Sintema di Firenze ad ambienti lacustri e di fan-delta e il Sintema dell'Arno ad ambienti fluvio-alluvionale e limno-palustre.

3.2.4. Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia

E' costituito dai depositi lacustri villafranchiani, a sua volta composto dalle Argille turchine AUCTT. e dai Depositi clastici di delta e fan delta dei paleo-torrenti. Tali unità vengono di seguito descritte dalla più antica alla più recente.

3.2.4.1. Argille turchine AUCTT.

Questa unità è costituita da massicci corpi di argille e argille limose di colore grigio-azzurro, deposte in ambiente lacustre in condizioni climatiche fredde (periodi glaciali Biber e Donau). Sono presenti livelli e lenti di ghiaie e sabbie, in genere sporchi. Frequenti interdigitazioni avvengono con i depositi di delta e fan-delta dei paleo-corsi d'acqua provenienti dai rilievi posti più a nord, come il paleo-Mugnone, il paleo-Affrico e il paleo-Terzolle. Nella zona del centro cittadino le argille azzurre raggiungono spessori massimi di 90 m, mentre arrivano a 160 m nelle zone ubicate a nord-est della città.

3.2.4.2. Depositi clastici di delta e fan-delta dei paleo-torrenti

Si tratta di ciottolami e ghiaie prevalentemente sporchi, ghiaie sabbiose, sabbie limose e limi sabbiosi, in corpi più o meno massivi e/o canalizzati, formati a opera dei vari torrenti confluenti nel lago. A essi sono riconducibili i depositi del paleo-Affrico/Mensola, del paleo-Mugnone, del paleo-Terzolle e, con provenienze dal bordo meridionale, dal paleo-Ema/Greve. Questi terreni costituiscono i depositi clastici più profondi del bacino di Firenze, riconducibili a periodi caratterizzati da un clima a forte piovosità. Al Sistema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia, in particolare alle Argille turchine AUCTT., Capecchi *et al.* (1976b) hanno fatto corrispondere l'Orizzonte Firenze 4 (si veda il § 3.3.4).

3.2.5. Sintema di Firenze (Depositi alluvionali antichi)

E' costituito da ciottolami e ghiaie d'alveo del paleo-Arno e dei paleo-torrenti, con percentuale di matrice in modo variabile. Nella zona settentrionale urbana della città risultano frammisti a intervalli sabbioso-limosi di colore marrone scuro, mentre nella zona Cascine-Osmannoro-Legnaia risultano essere costituiti prevalentemente da ciottoli e ghiaie. In particolare, i depositi del paleo-Arno hanno costruito il conoide del fiume nel lago di Prato-Pistoia, ben sviluppato nella zona Cascine-Osmannoro con apice nella zona della Fortezza. A questi depositi, Capecchi *et al.* (1976b), hanno fatto corrispondere l'Orizzonte Firenze 3 (si veda il § 3.3.3). Il corpo sedimentario, che è stimato avere una potenza di una ventina di metri, è stato eroso dallo stesso Fiume Arno: di ciò si ha evidenza alle Cascine dove si trova a contatto direttamente tra il corpo sedimentario in questione e le ghiaie alluvionali recenti depositate dal fiume.

3.2.6. Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti)

Il Sintema del Fiume Arno è costituito dai depositi d'alveo e di esondazione recenti e attuali della coltre alluvionale deposta dal Fiume Arno e dei suoi affluenti nell'area fiorentina, in complessi rapporti di eteropie laterali erosive e sedimentarie. I primi metri superficiali (3÷5 m) sono composti da limi di esondazione sabbiosi. A questo intervallo è da far corrispondere l'Orizzonte Firenze 1 di Capecchi *et al.* (1976b) (si veda il § 3.3.1). I depositi d'alveo sono costituiti prevalentemente da ciottolami e ghiaie, con percentuale molto variabile della matrice fine, con intercalati livelli e lenti di sabbie. Le ghiaie compongono il corpo clastico principale, rilevato sull'intera superficie fiorentina, ed è l'intervallo corrispondente all'Orizzonte Firenze 2 di Capecchi *et al.* (1976b) (si veda il § 3.3.2), il cui spessore varia da pochi metri fino a 20÷30 m. La deposizione delle ghiaie è avvenuta su una superficie di erosione sui corpi sedimentari che possono essere sia i depositi alluvionali antichi che il substrato pre-pliocenico. L'ambiente di deposizione era tipicamente fluviale a caratterizzato da alta energia. Come detto, i Depositi alluvionali recenti sono da ricondurre all'azione sedimentaria sia del Fiume Arno che degli affluenti principali (Torrente Mugnone, Torrente Terzolle, Torrente Affrico, Torrente Mensola). Nella piana fra Campi Bisenzio e Sesto Fiorentino-Castello i Depositi alluvionali recenti sono costituiti da sedimenti di ambiente limno-palustre, i quali raggiungono uno spessore che va da un paio di metri a nord della piana fino a qualche metro nella parte a sud, con presenza di livelli torbosi nella piana di Sesto Fiorentino. I Depositi alluvionali recenti costituiscono il principale acquifero dell'area fiorentina (ghiaie dell'Orizzonte Firenze 2, che si trovano spesso a contatto diretto con il corpo sedimentario costituito dall'Orizzonte Firenze 3), come esposto dettagliatamente nel prosieguo.

3.3. Orizzonti "Firenze"

In Capecchi, Guazzone, Pranzini, (1976b), sono stati identificati e definiti quattro livelli denominati *orizzonti Firenze* (figura 2), corrispondenti a successive fasi di deposizione. Tale suddivisione risulta fondamentale per approfondire e comprendere le caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sito in studio.

3.3.1. Orizzonte "Firenze 1"

Si tratta dello strato superficiale indicato dai vecchi Autori col nome di *pancone* o *gentilone*. E' costituito da sabbia fine con argilla con le ghiaie e i ciottoli frequentemente

dispersi nel banco e più rare piccole lenti di argilla. In varie località l'orizzonte Firenze 1 è composto da sabbie anche grossolane e relativamente pulite come, a esempio, all'Anconella e in altri luoghi in prossimità del Fiume Arno. Da notare che nel centro della città alla composizione di questo strato contribuiscono in buona parte materiali di scarico derivanti dalle rovine di costruzione di varie epoche. Questo strato superficiale, costituito in massima parte da materiale depositato dal Fiume Arno durante le piene, è presente in tutta l'area studiata a eccezione dell'area dell'Osmannoro a nord della Via Pistoiese. Il suo spessore varia da 3 a 9 metri ma nel centro della città ha una media di 4÷5 m.

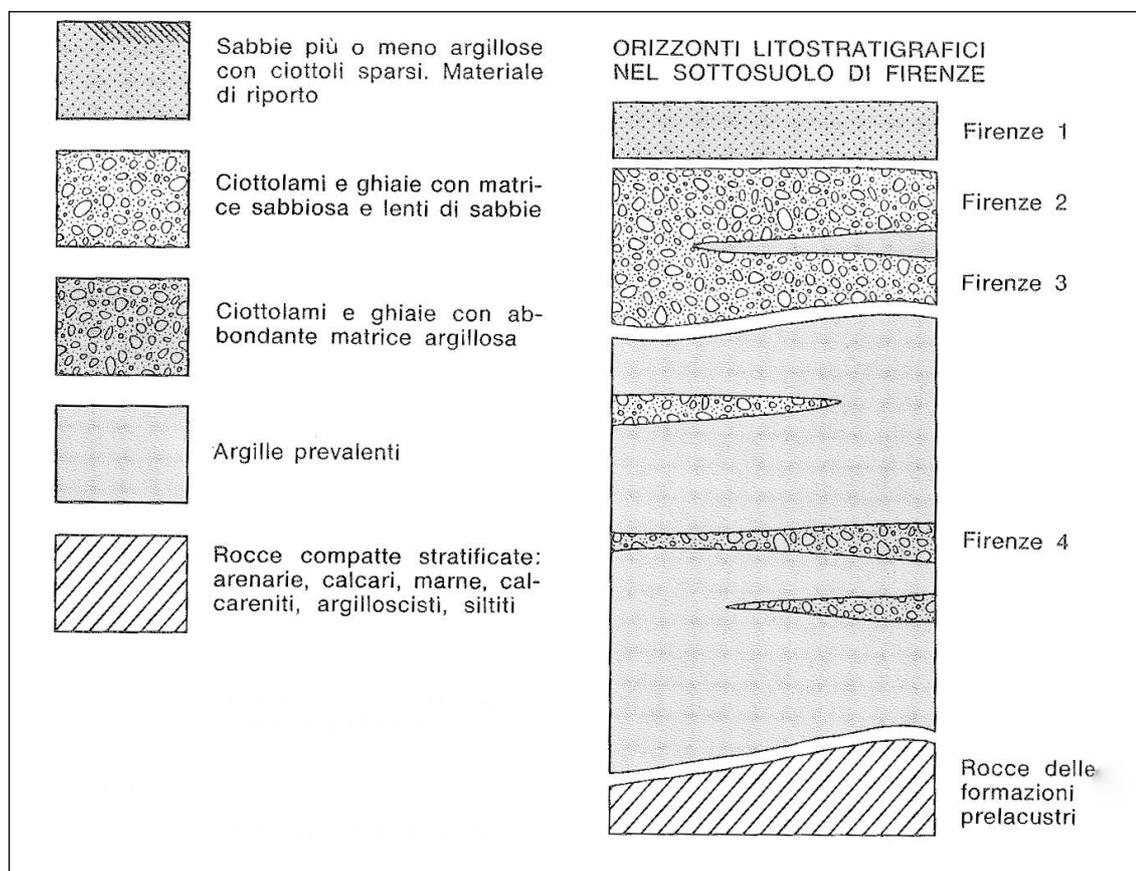


Figura 2 - Orizzonti stratigrafici presenti nel sottosuolo dell'area di Firenze (estratto da Capecchi et al., 1976b).

3.3.2. Orizzonte "Firenze 2"

Si tratta di depositi fluviali incoerenti che presentano notevoli e rapide variazioni granulometriche sia in senso verticale che orizzontale composti da ciottolami, ghiaie e sabbie. La frazione argillosa è di solito assai scarsa tanto da permettere una buona permeabilità. E' in questo livello, infatti, che trovano alimentazione quasi tutti i pozzi per acqua scavati fin da

epoche remote nell'area urbana. Sono presenti in questo intervallo sottili lenti di argilla plastica giallo-rossastra. Le caratteristiche sedimentologiche di questi depositi sono osservabili nelle cave per ghiaia scavate nelle zone delle Piagge, di Mantignano e di Varlungo-Coverciano. Nel corpo sedimentario si possono osservare canali di erosione e stratificazione incrociata. Uno studio granulometrico (Gori, 1970) ha messo in luce una distribuzione bimodale per la maggior parte dei campioni prelevati, un sorting basso e, in generale, indici sedimentologici che confermano la deposizione fluviale. In particolare, il regime doveva essere torrentizio e con notevole capacità di trasporto. La natura litologica dei ciottoli di questo orizzonte non è uniforme su tutta l'area in cui affiorano. Nella zona orientale, dall'Anconella al centro città, i ciottoli sono quasi esclusivamente formati da arenarie quarzoso-micacee, probabilmente provenienti dalla formazione Macigno. Lo studio dei campioni prelevati in pozzi situati nelle zone delle Cascine, di Mantignano e delle Piagge, ha messo in luce una maggiore eterogeneità litologica: insieme a quelli di arenaria Macigno, sono presenti ciottoli di calcareniti, spesso fossilifere, calcari di vario tipo e arenarie calcaree provenienti soprattutto dalle formazioni di Monte Morello, di Sillano e della Pietraforte. Lo spessore di questo orizzonte è molto variabile; diminuisce gradualmente verso i margini della pianura e verso ovest. In Capecchi *et al.* (1976b) sono riportate le isobate del tetto di questo orizzonte nell'area urbana che mettono in risalto, oltre ad una generale pendenza della superficie verso l'asse della valle e nel senso di scorrimento dell'Arno, alcune fasce di alto relativo piuttosto strette. Esse corrispondono probabilmente al percorso del Fiume Arno durante le ultime fasi di deposito dell'orizzonte macroclastico.

3.3.3. Orizzonte "Firenze 3"

L'Orizzonte Firenze 3 è composto da ciottolami, ghiaie e sabbie, con una matrice argillosa più abbondante che nei sedimenti macroclastici dell'orizzonte Firenze 2 soprastante, tanto da risultare meno permeabile. L'argilla è presente anche in lenti. Nella zona dell'Osmannoro una di queste lenti, dello spessore di 3÷4 m, divide l'orizzonte in due distinti livelli porosi. Dal punto di vista litologico i ciottoli sono molto eterogenei: prevalgono calcari e calcareniti provenienti dalle formazioni di Monte Morello e di Sillano, ma sono presenti anche ciottoli, in genere molto alterati, di arenaria Pietraforte e Macigno. L'impossibilità di osservare in affioramento i sedimenti di questo orizzonte non permette di definire con sicurezza

l'ambiente di deposizione. La maggior percentuale della matrice argillosa nei sedimenti più grossolani fa pensare ad un deposito lacustre prossimale, in corrispondenza dello sbocco di un fiume, con fasi di avanzamento e retrocessione della linea di riva del lago. L'Orizzonte Firenze 3 è in genere separato dall'Orizzonte Firenze 2 da uno strato di argilla turchina di probabile origine lacustre; nelle zone dove tale strato argilloso manca i due orizzonti ciottolosi non possono essere distinti con certezza.

3.3.4. Orizzonte "Firenze 4"

L'Orizzonte Firenze 4 è costituito da argille di origine lacustre, compatte, di colore turchino, più raramente giallastro, talora con lignite e torba. A vari livelli sono presenti lenti di ghiaie e ciottoli, più raramente di sabbie; in questi strati la matrice argillosa è quasi sempre abbondante, tanto da limitarne la permeabilità. La distribuzione areale di queste lenti a granulometria più grossolana è difficile da ricostruire con precisione, soprattutto perché sono pochi i sondaggi che hanno raggiunto e attraversato questa unità. Si osserva comunque che esse divengono meno frequenti e di minor spessore a valle di Firenze oltre la zona delle Cascine, procedendo verso ovest e nord-ovest. A monte di Firenze, nella zona dell'Anconella-Bandino, queste lenti sono invece più numerose e potenti che altrove e molte contengono solo una bassa percentuale della frazione argillosa. Questo fatto è probabilmente da mettere in relazione con lo sbocco, al margine sud-est della conca lacustre, di uno o più torrenti immissari con notevole trasporto solido. Nella parte basale dell'Orizzonte Firenze 4, al contatto con le rocce del paleoinvaso, è talora presente un piccolo livello (1÷3 m) di ciottoli anche molto grossi, ossidati e poco arrotondati, che può essere considerato un deposito di pseudo-trasgressione. La maggioranza dei ciottoli è costituita da calcari marnosi bianchi tipo alberese e subordinatamente da arenarie calcaree tipo Pietraforte e calcareniti. Lo spessore dell'Orizzonte Firenze 4 è determinato dalla quota del fondo lago: all'Anconella è intorno a 70 m mentre nel centro città, nella zona della stazione di Santa Maria Novella, è circa 25 m; esso aumenta rapidamente spostandosi a ovest delle Cascine fino a superare i 300 m nella zona di San Donnino.

3.3.5. Considerazioni sull'andamento degli orizzonti "Firenze"

Lo strato argilloso-sabbioso superficiale (Orizzonte Firenze 1), che raggiunge una potenza massima nel centro città, diminuisce di spessore verso la zona di Peretola; più a nord-

ovest e nella zona dell'Osmanoro, il tipo litologico presente nel sottosuolo fin dai primi metri è costituito da argilla compatta. L'Orizzonte Firenze 2 è presente in tutte le sezioni idrogeologiche elaborate da Capecchi *et al.* (1976b) che mostrano come la terminazione occidentale di questo intervallo coincida in tutti questi profili con la terminazione dell'Orizzonte Firenze 1. Si può ritenere quindi che oltre Peretola, a nord della Via Pistoiese, il Fiume Arno non si sia mai spinto a depositare né le sue alluvioni grossolane (Orizzonte Firenze 2), né quelle più fini recenti (Orizzonte Firenze 1). In alcune sezioni verso le colline si osserva la terminazione laterale dell'Orizzonte Firenze 2. Questi sedimenti fluviali si appoggiano su superfici di erosione dei sedimenti lacustri. L'Orizzonte Firenze 2 presenta il massimo spessore in una zona corrispondente più o meno col centro della città (Piazza D'Azeglio - Piazza San Marco). La diminuzione di spessore a partire da questa zona è evidente sia in senso longitudinale sia in senso trasversale. Come detto, solo in una sezione l'Orizzonte Firenze 2 risulta separato dall'Orizzonte Firenze 3 da una lente di argilla. In tutte le altre sezioni vi sono zone di contatto fra i due orizzonti, costituendo un unico intervallo poroso, interrotto solo localmente da lenti poco estese di argilla. In queste zone o c'è stata continuità nella sedimentazione grossolana, oppure episodi erosivi hanno distrutto la continuità dell'intervallo argilloso di separazione. Le sezioni documentano la maggior frequenza ed estensione dei ciottolami entro le argille lacustri (Orizzonte Firenze 4) nella zona orientale della conca di Firenze. Nella zona dell'Anconella questi ciottolami sono particolarmente abbondanti e relativamente puliti. La distinzione dai ciottolami fluviali sovrastanti si è basata non tanto sulla presenza del piccolo strato argilloso intorno ai 10 m di profondità, quanto sulle correlazioni granulometriche e litologiche di dettaglio. In particolare, in un pozzo il diagramma litologico presenta a 10 m un brusco aumento dei calcari e una corrispondente diminuzione delle arenarie; la stessa rapida variazione litologica è stata osservata in altri pozzi al passaggio fra i sedimenti fluviali e quelli sicuramente lacustri. Dalla zona delle Cascine procedendo verso ovest il substrato roccioso scende infatti molto rapidamente, fino a raggiungere la profondità di circa 300 m nella zona di Brozzi. Questa rapida discesa è determinata da una o più faglie trasversali al profilo che, in tempi relativamente recenti, hanno determinato il sollevamento della conca fiorentina rispetto al resto del bacino lacustre. Una sezione in particolare (Capecchi *et al.*, 1976b) mette bene in evidenza fra le Cascine e il Ponte San Niccolò l'alto relativo del substrato nel tratto urbano. In particolare, il tratto orizzontale del substrato rappresenta una superficie di erosione e

testimonia quindi una fase erosiva esercitata dall'Arno. In altre sezioni si può osservare come nel centro città il fondo sia relativamente alto. Tale alto trova una corrispondenza in superficie negli affioramenti del Macigno di Fiesole a nord e della Pietraforte del Piazzale Michelangiolo e di Bellosguardo a sud. In base alle stratigrafie e alle correlazioni nella pubblicazione più volte citata sono state ricostruite le curve di ugual spessore degli Orizzonti Firenze 2 e Firenze 3. Questi orizzonti, costituiti in prevalenza da sedimenti grossolani, sono quelli, in tutta la serie fluvio-lacustre, dotati della migliore permeabilità e rappresentano quindi gli acquiferi più importanti. Per quanto riguarda l'Orizzonte Firenze 2 si osserva in particolare che:

- l'orizzonte si estende su tutta la zona pianeggiante, salvo che a nord della linea Rifredi-Novoli-Peretola-Brozzi;
- nelle zone di Badia a Ripoli e Scandicci, rispettivamente a sud-est e a sud-ovest del centro fiorentino, i dati a disposizione indicano che l'Arno ha deposto i suoi sedimenti grossolani fino al margine della pianura;
- l'area di maggior spessore dell'orizzonte è fra piazza D'Azeglio e piazza del Duomo (circa 20 m). Quest'area costituisce il massimo assoluto entro una fascia che corrisponde all'asse centrale della valle;
- l'orizzonte continua ad ovest dell'area studiata, con spessori minori e, per quanto si può osservare nelle cave, con diminuzione delle dimensioni medie dei clasti.

Per l'Orizzonte Firenze 3 si osserva invece che:

- esso è limitato alla parte occidentale, ad ovest delle Cascine;
- gli spessori sono minori rispetto a quelli dell'Orizzonte Firenze 2;
- l'area di massimo spessore corrisponde ad una fascia presso l'attuale corso dell'Arno, più o meno sul proseguimento di quella dell'Orizzonte Firenze 2 (circa 12 m alle Piagge);
- anche questo orizzonte continua a ovest dell'area studiata, interessando una zona non occupata dai sedimenti dell'Orizzonte Firenze 2.

3.4. Geologia dell'area di intervento

Nell'area oggetto della presente relazione geologica, affiorano i Depositi Olocenici, in particolare i Depositi alluvionali recenti terrazzati (bna1e bna2), i Depositi alluvionali attuali (b), i Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5) e i Depositi antropici, discariche per inerti e rifiuti solidi (h1), come mostrato nella carta geologica riportata in allegato,

disegnata utilizzando i Fogli n. 275040 e 275080 della Carta Geologica Regionale della Regione Toscana – Servizio Geologico Regionale (*Progetto Carg*). Nel capitolo 3.2, è stato descritto il sottosuolo della piana di Firenze, costituito da sedimenti plio-quadernari di riempimento del bacino fluvio-lacustre formatosi a seguito della fase tettonica distensiva appenninica, depositi sulle rocce del paleoinvaso. I Depositi alluvionali recenti terrazzati corrispondono ai depositi del Sintema del Fiume Arno (Depositi alluvionali recenti, § 3.2.6), secondo la classificazione UBSU (Unconformity-bounded Stratigraphic Units) e possono essere inoltre correlati all'Orizzonte Firenze 1 e all'Orizzonte Firenze 2 di Capecci *et al.* (1976b) (si veda il § 3.3).

3.4.1. Depositi alluvionali recenti terrazzati e non terrazzati (bna)

Si tratta di depositi di origine alluvionale costituiti da ghiaie, sabbie e limi dei terrazzi fluviali di 1° e 2° ordine (bna1 e bna2, rispettivamente) i quali compongono la quasi totalità dei terreni affioranti nell'area della carta geologica.

Gli interventi oggetto della presente relazione saranno realizzati prevalentemente su questi depositi.

3.4.1.1. bna1 e bna2

Dall'esame della documentazione inerente le campagne di indagine si evince che, dal punto di vista meramente litologico, nell'area interessata dai lavori in progetto affiorano, al di sotto di alcuni decimetri di terreno vegetale (0,20÷0,40 m), limi, limi argillosi, argille limose e argille, a tratti debolmente sabbiosi. Il colore del terreno in posto nelle porzioni più superficiali è ocre, beige o bruno.

3.4.2. Depositi alluvionali attuali (b)

Sono costituiti da ghiaie, sabbie e limi dei letti fluviali attuali, soggetti ad evoluzione con ordinari processi fluviali, nella zona in studio sono presenti negli alvei sia naturali che artificiali del reticolo idrografico.

3.4.3. Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5)

L'unità raggruppa tutti quei depositi connessi con l'attività umana. Comprende quindi terreni di riporto, rilevati stradali, terreni di bonifica per colmata. In particolare, nell'area investigata, essi costituiscono i rilevati delle opere infrastrutturali come le autostrade e gli argini di fossi e di parte del reticolo idrografico minore della Piana (a esempio gli argini del

Fosso Reale).

3.4.4. Depositi antropici, discriche per inerti e rifiuti solidi [h1]

Questa unità identifica i terreni presenti in corrispondenza della discarica di Case Passerini, ubicata a nord della zona in esame, in prossimità della località Osmannoro. La discarica e gli impianti si trovano in un'area delimitata dal Fosso Reale (a sud), dall'autostrada A11 (a nordest) e dagli stagni di Focognano (a nordovest).

4. Idrogeologia

4.1. Aspetti idrogeologici generali

Con riferimento agli orizzonti descritti al § 3.3, dal punto di vista idrogeologico, l'Orizzonte Firenze 1 può essere considerato un acquitardo con permeabilità nell'ordine di 10^{-7} m/s. L'Orizzonte Firenze 2, invece, per le sue caratteristiche granulometriche e tessiturali, costituisce il corpo acquifero principale dell'area fiorentina, con permeabilità fortemente variabili, nell'ordine dei $10^{-3} \div 10^{-7}$ m/s. L'Orizzonte Firenze 3 presenta permeabilità generalmente più basse dell'Orizzonte Firenze 2, ma può comunque ospitare una significativa circolazione idrica. L'Orizzonte Firenze 4, infine, può essere sede di limitati acquiferi (in pressione) ubicati nelle lenti di ghiaie e sabbie che si trovano disperse all'interno del corpo costituito dalle argille turchine; tali acquiferi non sono ovviamente di interesse ai fini dello sfruttamento idrico.

La falda nell'area fiorentina è posizionata in corrispondenza dei Depositi Alluvionali Recenti (Orizzonte Firenze 2); oppure, nella zona delle Cascine-Osmannoro, nei Depositi Alluvionali Antichi (Orizzonte Firenze 3). L'acquifero più superficiale (Orizzonte Firenze 2) può essere rinvenuto nella maggior parte della pianura. Solo a ovest della città, lungo una linea pressappoco coincidente con la Via Pistoiese, i ciottolami e le ghiaie alluvionali recenti lasciano spazio, verso nord, ai limi e alle argille di natura lacustre o palustre. Il Fiume Arno non ha infatti scavato ed eroso i sedimenti fluvio-lacustri precedenti (Capecchi *et al.* 1976b). Il primo acquifero riscontrabile nell'area dell'Osmannoro è ubicato nei Depositi Alluvionali Antichi. Gli acquiferi sopra elencati sono caratterizzati da porosità primaria e dal punto di vista granulometrico sono composti da ciottoli, ghiaia e sabbia, con una percentuale variabile di matrice limoso-argillosa. Quest'ultima componente influenza indubbiamente il valore della

conducibilità idraulica (permeabilità). Tramite diverse tipologie di indagine, sono stati calcolati valori di permeabilità risultati variabili tra $10^{-3} \div 10^{-7}$ m/s. La falda è di tipo libero nella maggior parte della piana di Firenze, quindi il livello freatico e quello piezometrico corrispondono. Invece, ai margini della piana, dove sono presenti maggiori spessori degli intervalli superficiali composti dai limi di esondazione, la falda è di tipo semi-confinato (o addirittura confinato) e la superficie freatica si attesta a quote prossime alla superficie topografica. A Nord della via Pistoiese la prima falda può essere considerata confinata, dato che le ghiaie dell'Orizzonte Firenze 3 sono coperte da almeno 16 m di terreno a bassa permeabilità (riconducibile all'Orizzonte Firenze 1 passante verso nord ai sedimenti limno-palustri dei Depositi alluvionali recenti della piana di Sesto Fiorentino). Ugualmente confinate sono le falde ubicate nei livelli permeabili della successione fluvio-lacustre presente al di sotto dell'Orizzonte Firenze 2 (Orizzonte Firenze 4 corrispondente al Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia), costituiti da ghiaie e sabbie, spesso con matrice limosa abbondante. Come detto precedentemente, nelle lenti di ghiaie e sabbie che si rinvergono all'interno dei depositi lacustri delle argille azzurre, appartenenti al Sintema del Bacino di Firenze-Prato-Pistoia, sono ubicate falde confinate, peraltro alimentate con difficoltà dal fatto di essere disperse in potenti serie argillitiche.

Nella piana di Firenze le isofreatiche indicano, come andamento generale, un flusso di falda che dai rilievi collinari si dirige verso il Fiume Arno, con una componente verso ovest in modo concorde con la direzione di flusso dell'Arno. Il gradiente idraulico diminuisce dalle zone pedecollinari verso il centro della valle (da $1,0 \div 1,5$ % a $0,2$ %), dovuta all'aumento dei valori di trasmissività dei sedimenti.

4.2. Permeabilità delle unità litostratigrafiche affioranti nell'area in esame

Per quanto riguarda le caratteristiche idrogeologiche della principale unità geologica presente (bna), è possibile stimare la permeabilità su base qualitativa, in funzione degli elementi da cui dipende (caratteristiche litologiche dei terreni affioranti, presenza di pozzi, densità del reticolo idrografico) (carta idrogeologica). Nel dettaglio, i terreni di origine alluvionale presenti nelle aree di pianura sono dotati di permeabilità per porosità primaria legata alla presenza di pori tra le particelle del terreno, acquisita al momento della loro formazione. Tale permeabilità per i Depositi alluvionali recenti terrazzati (bna) è in genere bassa e diminuisce o aumenta in corrispondenza rispettivamente dei livelli fini o grossolani.

Durante le perforazioni di tutti i sondaggi realizzati per la campagna geognostica realizzata nel 2015 e 2017, in alcuni rari casi è stata rinvenuta acqua. La spiegazione dell'acqua rinvenuta sta nel fatto che il sottosuolo dell'area esaminata, costituito da terreni fine in massima parte rappresentati da argille e limi, è un acquicludo in cui si può avere, nelle stagioni delle piogge, presenza di acqua di ritenzione a causa dell'alta porosità, ma questa acqua non circola in quanto la porosità efficace è molto bassa, dell'ordine di pochi punti percentuali.

Per quanto concerne la permeabilità delle altre formazioni affioranti, è generalmente molto bassa per i Depositi antropici (h5 e h1), mentre può essere considerata media per i Depositi alluvionali attuali (b).

Nella carta idrogeologica riportata nella tavola allegata, le formazioni geologiche presenti nell'area sono state suddivise in base alla permeabilità precedentemente indicata e riassunta nella tabella 1.

Classe	Terreni permeabili per porosità primaria	Permeabilità
1	Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata (h5) Depositi antropici, discariche per inerti e rifiuti solidi (h1)	molto bassa
2	Depositi alluvionali recenti terrazzati (bna1 e bna2)	bassa
3	Depositi alluvionali attuali (b)	media
4	-	alta
5	-	molto alta

Tabella 1 - Classi di permeabilità.

Volendo invece fornire un valore indicativo del coefficiente di permeabilità K, si può far riferimento a quello ottenuto dalle prove edometriche desunte dalle prove eseguite sui campioni prelevati durante la perforazione dei sondaggi a carotaggio continuo che risulta dell'ordine di 1E-12 m/sec e 1E-10 m/sec e a quello derivante dalle prove di permeabilità in situ di tipo Lefranc eseguite durante la prima fase di indagine (n. 23), le quali non hanno fornito nella maggior parte dei casi valori di permeabilità indicativi per l'assenza di abbassamenti significativi; solo nel caso dei sondaggi S19 e S35 è stato ricavato un valore medio del coefficiente k pari rispettivamente a 3,62E-09 m/s (profondità prova 5,00÷7,00 m) e 4,47E-08 m/s (tra 25,00 e 30,00 m).

4.3. Superficie piezometrica

Durante l'esecuzione della quasi totalità dei sondaggi non è stata riscontrata la presenza di acqua; è comunque opportuno fare alcune precisazioni in merito alle interferenze eventualmente presenti e prevedibili tra gli interventi in progetto e le acque di sottosuolo.

Come detto nei capitoli precedenti, la zona in studio presenta schematicamente le seguenti caratteristiche idrogeologiche:

- superficialmente è presente un livello dello spessore di un paio di metri al di sotto del piano di campagna, che a seconda della stagione, può essere interessato da saturazione alla profondità compresa tra 0 e 1,5 m; questo livello non ha alcun valore e interesse dal punto di vista della risorsa idrica;
- al di sotto di due metri di profondità dal piano di campagna fino alla profondità di almeno 25 m non è mai stata registrata presenza di una falda;
- il livello in cui ha sede la falda principale della pianura fiorentina è identificato con l'Orizzonte Firenze 2 (parte inferiore del Sistema del Fiume Arno) e con l'Orizzonte Firenze 3 (Sistema di Firenze) che al di sotto dell'area di interesse per il presente studio non risultano essere presenti.

Per la realizzazione dell'opera in progetto son previsti movimenti terra (scavi e riporti) che coinvolgono comunque solo lo strato superficiale dell'Orizzonte Firenze 1 (porzione superiore del Sistema del Fiume Arno). Pertanto le uniche interferenze che si potranno avere tra le opere oggetto della presente relazione e le acque di sottosuolo saranno con quelle che stagionalmente vanno ad occupare i primi metri superficiali al di sotto del piano di campagna (e che quindi nel periodo estivo in cui si sono svolte le indagini del piano di caratterizzazione ambientale non sono state incontrate) e non interesseranno mai l'acquifero saturo principale in quanto assente nell'area di interesse e rilevato a sud nella zona dell'Osmannoro (§ 4.1).

Nella campagna di indagini geognostiche di riferimento per il presente studio, sono stato realizzati tre piezometri (nominati con le sigle S88, S90 e S112, si veda il § 8.1 e l'ubicazione delle indagini nella tavola allegata); le misure piezometriche effettuate in data 4 settembre 2017 (si veda l'allegato A fuori testo) indicano le quote riportate nella tabella 2 seguente. E' fondamentale sottolineare che, come sopra scritto, le misure eseguite rappresentano dei livelli piezometrici pertanto, nel caso di un acquifero libero, la superficie piezometrica corrisponde alla reale quota della falda freatica, mentre nel caso di un acquifero

confinato, o semi confinato, come quello dell'area di progetto, la superficie piezometrica misurata nei pozzi corrisponde a una quota fittizia, non reale, della falda nel terreno: la quota dell'acqua raggiunta nel pozzo, in questo caso, è determinata infatti dalla pressione dovuta alla differenza di carico tra la zona di alimentazione e l'opera di captazione considerata.

sigla piezometro	quota [m s.l.m.]	profondità [m da p.c.]
S88	34,42	2,75
S90	33,62	3,37
S112	32,42	3,16

Tabella 2 - Misure piezometriche (04/09/2017).

5. Geomorfologia e stabilità

5.1. Introduzione

I tratti delle nuove opere idrauliche esterne al sedime aeroportuale, verranno realizzati in un'area vasta facente parte per la maggior parte del Comune di Sesto Fiorentino, che va dal Lago di Peretola a sud-est (Nuovo Canale Lupaia Giunchi e Collettore per scarico cassa orientale) passando per il Polo Scientifico ed arrivando, nella parte nord-occidentale, fino al confine con il Comune di Campi Bisenzio, (zona Focognano, in cui il Nuovo Canale di Gronda si immette nella Gora di Acqualunga). La zona è pianeggiante ed è posta a quote variabili tra circa 35 e 39 m s.l.m..

La carta geomorfologica in allegato è stata elaborata a partire dai medesimo elaborato delle *Indagini geologico-tecniche* di supporto al Piano Strutturale intercomunale Calenzano e Sesto Fiorentino e degli *studi geologici e idrologici-idraulici* di supporto Piano Strutturale e del Regolamento Urbanistico del Comune di Campi Bisenzio. Le forme principali sono legate all'attività antropica che ha fortemente modificato il paesaggio; in particolare l'uomo ha creato una regimazione delle acque meteoriche e di ruscellamento superficiale di tipo artificiale, tale da ritenere assenti fenomeni erosivi di interesse. Le forme individuate sono state classificate in base all'origine e e distinte in due gruppi che vengono di seguito descritti.

5.1.1. *Forme di origine antropica*

Tra le forme legate all'attività antropica si osservano numerosi riporti come i rilevati arginali e stradali (Depositi antropici, terreni di riporto, bonifica per colmata); la discarica di Case Passerini (Discariche per inerti e rifiuti solidi e il lago di Peretola che rappresenta una cava inattiva).

5.1.2. *Forme dovute e processi fluviali*

Il contatto tra le due unità geologiche affioranti (bna1 e bna2 – carta geologica), coincide con il limite deposizionale della conoide alluvionale che è stata cartografata.

6. **Classi di pericolosità**

L'opera di cui si tratta ricade interamente nel territorio del Comune di Sesto Fiorentino e quest'ultimo è dotato del Piano Strutturale e del Regolamento Urbanistico e dunque delle Carte di pericolosità previste dalla legislazione vigente.

6.1. **Pericolosità geologica**

La *Carta della pericolosità geologica - sud* (Secondo il Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Calenzano e Sesto Fiorentino - Tavola IGT-PSI-3) classifica l'area in cui sorgerà l'opera in progetto in classe di pericolosità geologica medio-bassa (G2).

Per quanto riguarda il Piano di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, Piano Stralcio Assetto Idrogeologico (PAI) la zona in oggetto non è classificata nella cartografia a livello di sintesi e di dettaglio.

6.2. **Pericolosità idraulica**

La *Carta della pericolosità idraulica ai sensi del 53/R* (Secondo Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Calenzano e Sesto Fiorentino - Tavola IGT-PSI-9H) classifica l'area in cui sorgeranno le opere in progetto in parte in classe di pericolosità idraulica I.4 (alveo del Fosso Reale attuale), in parte in classe di pericolosità idraulica I.3 e in parte in classe di pericolosità idraulica I.3* (Aree di potenziale ristagno e/o insufficienza di drenaggio della rete di acque basse).

In riferimento al Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), è stato adottato nella seduta dalla Conferenza Istituzionale Permanente con la delibera n. 26 del 20 dicembre 2021 il

“primo aggiornamento PGRA (2021-2027)”, che rappresenta il riferimento in materia di pericolosità e rischio di alluvioni, l'area risulta caratterizzata dalle classi di pericolosità idraulica P2 e, limitatamente alle porzioni sul tracciato attuale del Fosso Reale, P3.

6.3. Pericolosità sismica

La *Carta della pericolosità sismica - sud* (Secondo Piano Strutturale Intercomunale dei Comuni di Calenzano e Sesto Fiorentino - Tavola IGT-PSI-4) classifica l'area di progetto in classe di pericolosità sismica media (S2).

7. Classi di fattibilità

7.1. Comune di Sesto Fiorentino

Nella *Relazione geologica di fattibilità (ai sensi del DPGR 53/R/2011)* a supporto del Secondo Regolamento Urbanistico sono presenti tre abachi ognuno per la corrispondente pericolosità (geologica, idraulica e sismica), ma per quanto riguarda le *opere idrauliche esterne al sedime* non vi è nulla cui possa essere assimilata quella cui si riferisce la presente relazione. Per l'attribuzione della classe di fattibilità ci si rifà ai concetti generali esposti nel DPGR 53/R/2011.

7.1.1. Fattibilità geologica

Vista la tipologia di intervento e la classe di pericolosità geologica medio-bassa - G2 (§ 6.1), si assegna, secondo i criteri della tabella A (contenuta nella *Relazione geologica di fattibilità ai sensi del DPGR 53/R/2011 a supporto del Secondo Regolamento Urbanistico Indagini Geologico-Tecniche e Idrauliche*) per interventi simili a quelli in oggetto, una fattibilità condizionata F.G.3. Le prescrizioni specifiche contenute nell'art. 45, comma 3 delle Norme Generali del Secondo Regolamento Urbanistico sono relative a interventi eseguiti su versanti o che interferiscano con edifici esistenti o in progetto.

7.1.2. Fattibilità idraulica

Gli interventi in progetto ricadono per la quasi totalità in pericolosità idraulica I.3 e I.3* (§ 6.2), in base all'abaco B della relazione di fattibilità precedentemente citata viene attribuita una fattibilità idraulica condizionata F.I.3 (interventi simili a quelli in oggetto, poiché anche in questo caso non presente l'intervento specifico in tabella). Anche laddove l'intervento in

progetto ricade in pericolosità idraulica I.4 viene attribuita una fattibilità idraulica condizionata F.I.3, considerato che il tracciato del Fosso Reale subirà un riassetto idraulico che comporterà una nuova configurazione che circoiterà la nuova pista.

7.1.3. Fattibilità sismica

Viste le tipologie di intervento previste e vista la classe di pericolosità sismica media (S2) si ritiene di attribuire una classe di fattibilità 2 con normali vincoli. Il comma 2 dell'articolo 47 delle Norme Generali del Secondo Regolamento Urbanistico, stabilisce che per questa classe di fattibilità *non sussistono condizioni di fattibilità specifiche per la fase di predisposizione dei Piani Attuativi o dei Progetti Unitari, ovvero per la valida formazione dei titoli o atti abilitativi all'attività edilizia.*

8. Risultati delle indagini eseguite

8.1. Generalità

Come detto in premessa, le indagini di riferimento per il presente studio sono quelle eseguite dalla società Ambiente sc di Carrara, su incarico di Toscana Aeroporto Engineering S.r.l., nella *Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie* dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci nel 2015 e nel 2017. In particolare, per lo studio delle caratteristiche litologiche, stratigrafiche e meccaniche dei terreni presenti nell'area interessata dal presente progetto, sono state utilizzate le seguenti indagini geognostiche ubicate come mostrato nella tavola in allegato:

- n. 24 (ventiquattro) prove penetrometriche statiche denominate CPT04÷06, CPT08, CPT09, CPT12÷16, CPT20, CPT24, CPT28÷30, CPT32, CPT36, CPT50÷51, CPT58÷59 e CPT60÷62, che hanno raggiunto le profondità comprese tra 5,40 e 7,20 m dal p.c., eseguite dalla società Geosol S.n.c. di Sovicille (Provincia di Siena);
- n. 17 (diciassette) prove penetrometriche statiche con piezocono denominate CPTU01÷10, CPTU12, CPTU13, CPTU15÷17, CPTU20, CPTU24 e CPTU25, che hanno raggiunto le profondità comprese tra 7,17 e 11,18 m dal p.c., eseguite dalla società Geosol S.n.c. di Sovicille (Provincia di Siena);
- n. 16 (sedici) sondaggi a carotaggio continuo denominati S06, S09÷S12, S14, S24, S34, S69, S71, S75÷S78, S87, S89, aventi una profondità di 4,0 m dal p.c.;

- n. 6 (sei) sondaggi a carotaggio continuo denominati S30, S86, S110, S111, S114 e S115, aventi una profondità di 7,0 m dal p.c.;
- n. 5 (cinque) sondaggi a carotaggio continuo denominati S13, S19, S22, S28 e S39 della profondità di 10,0 m dal p.c., attrezzati a piezometro;
- n. 11 (undici) sondaggi a carotaggio continuo denominati S05, S90, S92, S100, S101, S103, S106, S107, S109, S112, S116, aventi una profondità di 15,0 m dal p.c.;
- n. 3 (tre) sondaggi a carotaggio continuo denominati S90, S107 e S112, della profondità di 15,0 m dal p.c., attrezzato a piezometro;
- n. 3 (tre) sondaggi a carotaggio continuo denominati S91, S96 e S117, della profondità di 32,0 m dal p.c.;
- esecuzione di Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite in alcuni sondaggi, come riassunto nella tabella 3;
- prelievo di campioni indisturbati con fustella di tipo Shelby dai sondaggi realizzati, alle profondità indicate nelle tabelle 4 e 5;
sui campioni sopra elencati sono state eseguite alcune prove geotecniche da parte del laboratorio Igetecma S.n.c. di Montelupo Fiorentino (Provincia di Firenze) che sono descritte nel § 8.4;
- esecuzione di n. 6 (sei) indagini geofisiche di superficie mediante metodologia di tipo Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) denominate MASW2, MASW5, MASW7, MASW8, MASW10 e MASW11, quelle della seconda fase (2017) associate a misure di sismica passiva Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr), realizzate dalla società Geosol S.n.c. di Sovicille (Provincia di Siena);
- esecuzione di n. 8 (otto) indagini geofisiche di sismica a rifrazione in onde P e onde S denominata RIFR2÷7, RIFR9 e RIFR11, realizzate dalla società Geosol S.n.c. di Sovicille (Provincia di Siena).

Gli allegati A e B raccolgono le stratigrafie dei sondaggi con le foto delle cassette catalogatrici, i certificati delle prove penetrometriche e i certificati delle analisi geotecniche di laboratorio.

Nell'allegato C è invece riportato il rapporto finale delle indagini sismiche.

Sigla sondaggio	S.P.T.	Profondità [m da p.c.]	Profondità [m s.l.m.]	N1	N2	N3	N _{SPT}
S91	1	2,60 ÷ 3,05	37,951 ÷ 37,501	3	5	8	13
	2	7,00 ÷ 7,45	33,551 ÷ 33,101	6	10	11	21
S92	1	2,10 ÷ 2,55	38,473 ÷ 38,023	3	4	7	11
	2	5,00 ÷ 5,45	35,573 ÷ 35,123	4	6	8	14
S96	1	2,10 ÷ 2,55	37,662 ÷ 37,212	3	5	9	14
	2	4,00 ÷ 4,45	35,762 ÷ 35,312	7	11	12	23
	3	7,00 ÷ 7,45	32,762 ÷ 32,312	9	13	14	27
S100	1	4,00 ÷ 4,45	33,755 ÷ 33,305	6	11	14	25
	2	8,00 ÷ 8,45	29,755 ÷ 29,305	13	15	15	30
S101	1	3,50 ÷ 3,95	34,118 ÷ 33,668	4	6	7	13
	2	9,00 ÷ 9,45	28,618 ÷ 28,168	8	11	13	24
S103	1	3,50 ÷ 3,95	32,328 ÷ 31,878	7	9	9	18
	2	8,00 ÷ 8,45	27,828 ÷ 27,378	11	15	15	30
S106	1	4,00 ÷ 4,45	34,312 ÷ 33,862	5	6	6	12
S107	2	6,00 ÷ 6,45	32,312 ÷ 31,862	8	10	12	22
	1	3,00 ÷ 3,45	32,016 ÷ 31,566	6	8	7	15
S109	2	6,00 ÷ 6,45	29,016 ÷ 28,566	9	9	11	20
	1	2,60 ÷ 3,05	40,086 ÷ 39,636	10	15	20	35
	2	5,50 ÷ 5,95	37,186 ÷ 36,736	5	7	10	17
S116	1	2,10 ÷ 2,55	34,732 ÷ 34,282	2	3	3	6
S117	2	5,00 ÷ 5,45	32,232 ÷ 31,782	8	14	18	32
	1	2,60 ÷ 3,05	34,024 ÷ 33,574	3	4	3	7
	2	7,00 ÷ 7,45	29,624 ÷ 29,174	9	16	0	36

Tabella 3 - Standard Penetration Test (S.P.T.) eseguite durante la perforazione dei sondaggi.

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S5	CI1	1,50 ÷ 2,00	33,90-33,40
	CI2	4,00-4,50	31,40-30,90
	CI3	12,00-12,50	23,40-22,90
S6	CI1	1,00-1,50	35,85-35,35
S9	CI1	1,00-1,50	35,50-35,10

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S10	CI1	1,50-2,00	34,90-34,40
S12	CI1	1,00-1,50	36,05-35,55
S13	CI1	1,00-1,50	34,75-34,25
S14	CI1	1,00-1,45	34,825-34,375
S22	CI1	1,00-1,50	36,175-35,675
S26	CI1	1,00-1,50	35,875-35,375
S28	CI1	0,50-1,00	37,45-36,95
	CI2	1,30-1,80	36,65-36,15
S30	CI1	1,00-1,50	37,26-36,76
S34	CI1	1,00-1,50	37,65-37,15
S39	CI1	1,00-1,60	37,925-37,325
S71	CI1	1,50-2,00	38,825-38,325
S75	CI1	1,50-2,00	33,775-33,275
S76	CI1	1,50-2,00	33,825-33,325
S77	CI1	1,50-2,00	34,95-34,45

Tabella 4 - Campioni indisturbati della campagna del 2015.

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S87	CI1	2,00 ÷ 2,50	33,823 ÷ 33,323
S89	CI1	1,50 ÷ 2,00	35,257 ÷ 34,757
S91	CI1	2,00 ÷ 2,50	38,551 ÷ 38,051

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
	CI2	4,50 ÷ 5,00	36,051 ÷ 35,551
	CI3	9,00 ÷ 9,50	31,551 ÷ 31,051
S92	CI1	1,50 ÷ 2,00	39,073 ÷ 38,573
	CI2	3,5 ÷ 4,00	37,073 ÷ 36,573
	CI3	6,50 ÷ 7,00	34,073 ÷ 33,573
S93	CI1	1,30 ÷ 1,80	37,395 ÷ 36,895
	CI2	4,00 ÷ 4,50	34,695 ÷ 34,195
S94	CI1	2,00 ÷ 2,50	36,972 ÷ 36,472
	CI2	3,50 ÷ 4,00	35,472 ÷ 34,972
	CI3	5,50 ÷ 6,00	33,472 ÷ 32,972
S95	CI1	2,50 ÷ 3,00	36,556 ÷ 36,056
	CI2	4,50 ÷ 5,00	34,556 ÷ 34,056
	CI3	7,50 ÷ 8,00	31,556 ÷ 31,056
S96	CI1	1,50 ÷ 2,00	38,262 ÷ 37,762
	CI2	5,50 ÷ 6,00	34,262 ÷ 33,762
	CI3	9,00 ÷ 9,50	30,762 ÷ 30,262
S97	CI1	0,50 ÷ 1,00	38,711 ÷ 38,211
	CI2	4,00 ÷ 4,50	35,211 ÷ 34,711
S100	CI1	1,50 ÷ 2,00	36,255 ÷ 35,755
	CI2	3,00 ÷ 3,50	34,755 ÷ 34,255
	CI3	5,00 ÷ 5,50	32,755 ÷ 32,255
S101	CI1	0,50 ÷ 1,00	37,118 ÷ 36,618

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
	CI2	2,50 ÷ 3,00	35,1183 ÷ 34,618
	CI3	4,00 ÷ 4,60	33,618 ÷ 33,018
S103	CI1	0,50 ÷ 1,00	35,328 ÷ 34,828
	CI2	2,00 ÷ 2,50	33,828 ÷ 33,328
	CI3	4,00 ÷ 4,50	31,828 ÷ 31,328
S106	CI1	1,50 ÷ 2,00	36,812 ÷ 36,312
	CI2	3,00 ÷ 3,50	35,312 ÷ 34,812
S107	CI1	0,50 ÷ 1,00	34,516 ÷ 34,016
	CI2	2,00 ÷ 2,50	33,016 ÷ 32,516
	CI3	4,00 ÷ 4,50	30,016 ÷ 29,516
S109	CI1	2,00 ÷ 2,50	40,686 ÷ 40,186
	CI2	4,00 ÷ 4,50	38,686 ÷ 38,186
	CI3	7,00 ÷ 7,50	35,686 ÷ 35,186
S116	CI1	2,50 ÷ 3,00	34,332 ÷ 33,832
	CI2	3,50 ÷ 4,00	33,332 ÷ 32,832
	CI3	6,00 ÷ 6,50	30,832 ÷ 30,332
S117	CI1	2,00 ÷ 2,50	34,624 ÷ 34,124
	CI2	4,50 ÷ 5,00	32,124 ÷ 31,624
	CI3	9,00 ÷ 9,50	27,624 ÷ 27,124
S121	CI1	2,50 ÷ 3,00	36,498 ÷ 35,998
	CI2	5,00 ÷ 5,50	33,998 ÷ 33,498
	CI3	8,00 ÷ 8,50	30,998 ÷ 30,498

sigla sondaggio	sigla campione	profondità [m da p.c.]	quota [m s.l.m.]
S122	CI1	1,50 ÷ 2,00	37,722 ÷ 37,222
	CI2	3,00 ÷ 3,50	36,222 ÷ 35,722

Tabella 5 - Campioni indisturbati della campagna del 2017.

8.2. Prove penetrometriche

8.2.1. Prove penetrometriche statiche (CPT)

Le prove penetrometriche statiche sono state realizzate con un penetrometro cingolato gommato, modello TG 63-200 KN, capace di una spinta di 200 kN (20 ton), progettato e prodotto da Pagani Geotechnical Equipment di Piacenza; le verticali hanno raggiunto il rifiuto strumentale a una profondità inferiore ai 15 m dal p.c. previsti. Le prove hanno fornito le seguenti informazioni (si vedano i certificati nell'allegato B):

- Prova penetrometrica statica CPT 04:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie, , prevalenti fino a 3,0 m;
 - dopo un primo strato avente lo spessore di 0,8 m caratterizzato da valori di qc maggiori di 40 kg/cm², si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità (più netto a partire da 3,0 m), fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 05:
 - profondità indagata: 6,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato un alternanza di argille e/o limi e limi e/o sabbie (questi ultimi prevalenti a partire da 2,40 m dal p.c.), con un livello francamente sabbioso a 3,4 m da p.c.;

- dopo un picco iniziale dei valori di q_c e f_s (spessore 1,0 m) ed un secondo livello fino a 2,40 m caratterizzato da valori costanti, si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 06:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale q_c e laterale f_s), integrata con quella di Schmertmann (q_c - f_s / q_c), la verticale di indagine mostra fino a 3,6 limi e/o sabbie con livelli di argille organiche; sono presenti poi argille e/o limi;
 - salvo un picco dei valori di q_c e f_s tra 2,2 e 2,4 m dal p.c., si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 08:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale q_c e laterale f_s), integrata con quella di Schmertmann (q_c - f_s / q_c), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie e francamente sabbiosi (tali livelli sono prevalenti nei primi 2,60 m dal p.c.);
 - dopo un primo strato avente lo spessore di 0,8 m caratterizzato da valori di q_c maggiori di 40 kg/cm², ed un secondo fino a 2,60 m con q_c piuttosto costante, si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 09:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale q_c e laterale f_s), integrata con quella di Schmertmann (q_c - f_s / q_c), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie, sabbie, sabbie e/o ghiaie (tali livelli sono prevalenti nei primi 3,4 m dal p.c.);
 - è presente un picco iniziale caratterizzato da valori di q_c e f_s elevati, poi, a partire da 3,0 m dal p.c., si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale

con la profondità, fino al rifiuto strumentale.

- Prova penetrometrica statica CPT 12:
 - profondità indagata: 5,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi (prevalenti in profondità, da 3,40 m) con presenza di livelli di limi e/o sabbie e più raramente sabbie (tali livelli si incontrano fino a 1,40 m) e argille organiche;
 - si osserva un picco iniziale dei valori di qc e fs, fino a 0,8 m dal p.c. e poi, a partire da 3,0 m dal p.c., un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 13:
 - profondità indagata: 6,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie nel primo metro, tra 1,4 e 1,6 m dal p.c., tra 3,2 e 3,6 m dal p.c. e di un intervallo di sabbie e/o ghiaie tra 0,6 e 0,8 m dal p.c.;
 - a partire da 5,2 m dal p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 14:
 - profondità indagata: 9,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), sono presenti torbe e/o argille organiche prevalenti fino a 3,2 m da p.c. e al di sotto argille e/o limi prevalenti; all'interno di questi livelli principali si incontrano intervalli di limi e/o sabbie (0,4÷0,8 m, 1,0÷1,4 m, 7,8÷8,4 m, 8,6÷9,0 m dal p.c.) e di un intervallo di sabbie e/o ghiaie tra 0,2 e 0,4 m dal p.c.;
 - a partire da 5,2 m dal p.c. si osserva un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.

- Prova penetrometrica statica CPT 15:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,6÷1,2 m, 1,8÷2,0 m, 2,6÷2,8 m, 3,2÷3,4 m e 5,6÷6,0 m dal p.c.), livelli francamente sabbiosi (0,0÷0,4 m, 2,4÷2,6 m, 3,0÷3,2 m e 4,0÷4,2 m dal p.c.) e torbe/argille organiche tra 3,8 e 4,0 m da p.c.;
 - la resistenza alla punta ha valori alti fino a 1,0 m dal p.c., successivamente aumenta gradualmente con la profondità; la resistenza laterale ha una leggera tendenza all'aumento con la profondità fino alla profondità di rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 16:
 - profondità indagata: 6,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli francamente sabbiosi (1,0÷1,4 m e 3,6÷3,8 m dal p.c.), torbe/argille organiche (0,2÷0,4 m, 2,6÷2,8 m, 2,0÷2,6 m, 3,0÷3,2, 4,4÷4,6 m e 5,0÷5,2 m dal p.c.) e di limi e/o sabbie tra 0,6÷1,0 m e 1,4÷1,6 m dal p.c.;
 - la resistenza alla punta ha valori alti fino a 1,0 m dal p.c., successivamente scende fino alla profondità di 3,2 m da p.c. per poi aumentare fino a raggiungere il rifiuto strumentale; la resistenza laterale sale fino alla profondità di 0,6 m da p.c., successivamente i valori diminuiscono fino a 1,4 m da p.c., si osserva poi un aumento di fs fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 20:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli torbe/argille organiche (0,0÷0,6 m, 1,2÷1,4 m, 1,8÷2,0 m, 4,8÷5,0 m e 5,8÷6,0 dal p.c.) di limi e/o sabbie (1,6÷1,8 m, 2,2÷3,0 m, 3,6÷4,0 m e 4,6÷4,8 m dal p.c.), due orizzonti francamente sabbiosi tra la

profondità tra 0,8÷1,0 m e 4,2÷4,4 m dal p.c. e un intervallo di sabbie e/o ghiaie alla profondità compresa tra 4,0÷4,2 m dal p.c.;

- i valori della resistenza alla punta aumentano repentinamente nei primi 0,8 m dal p.c. per poi crescere, da 1,0 m da p.c., più gradualmente con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale mostra invece piccole variazioni rimanendo su valori bassi fino alla profondità di 4,6 m dal p.c., successivamente si osserva un aumento della resistenza laterale fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 24:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli francamente sabbiosi (0,2 e 0,4 m, 0,6 e 0,8 m e 3,6 e 4,0 m dal p.c.), limi e/o sabbie (0,4÷0,6 m e 3,8÷4,4 m dal p.c.) e un orizzonte di torba/argille organiche alla profondità compresa tra 1,6÷1,8 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta aumentano con la profondità fino al rifiuto strumentale; la resistenza laterale ha piccole oscillazioni rimanendo su valori bassi fino alla profondità di 4,0 m dal p.c., successivamente si osserva un aumento fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 28:
 - profondità indagata: 7,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,2÷0,4 m, 1,5÷1,7 m, 2,0÷2,6 m, 3,0÷3,2 m, 3,8÷4,0 m dal p.c.), torbe/argille organiche (0,6÷1,0 m, 1,2÷1,4 m, 2,7÷2,9 m, 3,4÷3,6 m, 5,4÷5,6 m, 5,8÷6,0 m dal p.c.) e un livello francamente sabbioso tra 2,4 e 2,6 m dal p.c.;
 - a partire da 1,2 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 29:
 - profondità indagata: 7,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);

- seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,5÷0,7 m, 1,5÷1,7 m, 1,7÷1,9 m, 2,3÷2,8 m, 3,2÷3,6 m, 7,7÷7,9 m e 7,1÷7,2 m dal p.c.), torbe/argille organiche (0,7÷0,9 m, 2,1÷2,3 m, 4,3÷4,5 m, 5,3÷5,5 m e 6,1÷6,3 dal p.c.) e un livello francamente sabbioso tra 3,9 e 4,1 m dal p.c.;
- a partire da 1,8 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 30:
 - profondità indagata: 7,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,9÷1,1 m, 1,7÷2,1 m, 2,9÷3,1 m, 3,3÷3,5 m e 4,9÷5,1, 5,9÷5,5 m, 6,5÷6,7 m e 5,1÷5,3 m dal p.c.), torbe/argille organiche (1,1÷1,7 m, 2,5÷2,7 m, 4,3÷4,5 m, 4,7÷4,9 m dal p.c.) e due livelli francamente sabbiosi tra 3,1 e 3,3 m e tra 4,5÷4,7 m da p.c.;
 - a partire da 1,2 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta con la profondità, fino al rifiuto strumentale, la resistenza laterale invece oscilla su valori simili per tutta la lunghezza della prova.
- Prova penetrometrica statica CPT 32:
 - profondità indagata: 6,8 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli francamente sabbiosi (0,2 e 0,4 m, 0,6 e 1,0 m e 5,0 e 5,2 m dal p.c.), limi e/o sabbie (4,0 e 4,4 m, 5,0 e 5,2 m e 5,6 e 6,0 m dal p.c.) e un orizzonte di torbe/argille organiche alla profondità compresa tra 1,0 e 1,2 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta aumentano repentinamente nel primo metro, successivamente i valori scendono fino alla profondità di 1,8 m dal p.c. per poi aumentare di nuovo con la profondità fino al rifiuto; la resistenza laterale oscilla su valori bassi fino al rifiuto strumentale.

- Prova penetrometrica statica CPT 36:
 - profondità indagata: 6,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,0 e 0,4 m, 1,6 e 2,0 m, 2,8 e 3,0 m, 5,2 e 5,4 m, 5,6 e 5,8 m e 6,0 e 6,2 m dal p.c.) e due orizzonti di torbe/argille organiche alle profondità comprese tra 1,4 e 1,8 m e tra 3,6 e 3,8 m dal p.c.;
 - i valori della resistenza alla punta oscillano su valori costanti fino alla profondità di 5,2 m dal p.c. (tranne alla profondità compresa tra 2,0 m e 2,4 m da p.c. dove è presente un livello con alti valori di resistenza alla punta), successivamente i valori tendono ad aumentare fino al rifiuto strumentale; i valori della resistenza laterale oscillano su valori bassi per poi raggiungere il rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 50:
 - profondità indagata: 6,6 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato un'alternanza di argille e/o limi e limi e/o sabbie, con alcuni livelli francamente sabbiosi;
 - dopo un picco iniziale dei valori di qc e fs, fino a 1,0 m dal p.c., si osserva, a partire da 2,4 m, un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.
- Prova penetrometrica statica CPT 51:
 - profondità indagata: 5,4 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato in prevalenza argille e/o limi con alcuni livelli di limi e/o sabbie;
 - dopo un picco iniziale dei valori di qc e fs, fino a 1,0 m dal p.c., si osserva, a partire da 2,2 m, un progressivo aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;

- Prova penetrometrica statica CPT 58:
 - profondità indagata: 6,0 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,0÷0,2 m, 1,0÷1,2 m, 2,2÷2,6 m, 3,0÷3,6 m dal p.c.) e di un livello francamente sabbioso tra 2,6 e 3,0 m dal p.c.;
 - a partire da 3,1 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 59:
 - profondità indagata: 6,8 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe e/o argille (0,0÷0,4 m, 0,6÷1,0 m, 2,4÷3,0 m, 3,0÷3,6 m dal p.c.) e di limi e/o sabbie (0,4÷0,6 m, 1,0÷1,4 m, 4,0÷4,6 m dal p.c.);
 - a partire da 5,0 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 60:
 - profondità indagata: 7,2 m dal p.c. (rifiuto strumentale);
 - seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di torbe e/o argille (0,0÷0,6 m, 3,2÷3,4 m dal p.c.) e di limi e/o sabbie (0,6÷1,0 m, 1,4÷1,8 m, 2,2÷2,4 m, 4,8÷5,4 m, 6,8÷7,0 m dal p.c.);
 - a partire da 3,2 m dal p.c. si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale;
- Prova penetrometrica statica CPT 61:
 - profondità indagata: 6,80 m dal p.c. (rifiuto strumentale);

- seguendo l'interpretazione litologica di Begemann (rapporto tra resistenza laterale qc e laterale fs), integrata con quella di Schmertmann (qc-fs/qc), la verticale di indagine ha attraversato argille e/o limi con presenza di livelli di limi e/o sabbie (0,6÷0,8 m, 1,0÷1,2 m, 2,0÷2,4 m, 3,4÷4,0 m, 5,0÷5,6 m, 6,6÷6,8 m dal p.c.) e di livelli francamente sabbiosi (0,8÷1,0 m, 1,2÷1,4 m, 1,6÷2,0 m, 6,4÷6,6 m dal p.c.);
- si osserva un generale aumento della resistenza alla punta e laterale con la profondità, fino al rifiuto strumentale.

Tenendo conto delle principali suddivisioni individuabili sulle verticali delle prove penetrometriche secondo le interpretazioni litologiche di riferimento, i parametri geotecnici forniti dalla ditta esecutrice (allegato B), sono stati elaborati statisticamente sulla base del 5° percentile della distribuzione dei dati per il calcolo del valore caratteristico (si veda il § 10.2.1)

8.2.2. Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)

Le prove penetrometriche statiche CPTU sono state eseguite con un penetrometro cingolato gommato, modello TG 63-200 KN, capace di una spinta di 200 kN (20 ton), progettato e prodotto da Pagani Geotechnical Equipment di Piacenza, attrezzato con punta elettrica/piezocono Geotech. Le prove sono state realizzate secondo le specifiche ASTM D 5578 - 95 (*Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*) e ISSMFE (*Technical Committee on Penetration Testing (1988) - Cone Penetration Test (CPT): International Reference Test Procedure*). Le verticali hanno raggiunto il rifiuto strumentale a una profondità inferiore ai 15 m dal p.c. previsti. Di seguito si descrivono le prove eseguite (si vedano i certificati nell'allegato B):

- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 01:
 - Profondità indagata: 9,72 m dal p.c.;
 - Nel primo metro circa dal p.c., elevati valori della resistenza alla punta (qc), con picco fino a circa 10 MPa alla profondità di 50 cm dal p.c., primo metro di spessore costituito prevalentemente da sabbia limosa e limo sabbioso nella metà superiore e terreni coesivi molto consistenti nella metà inferiore di questo intervallo (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino a fondo foro, si ha una drastica riduzione della qc nella colonna argillosa, con qc compresa mediamente fra 2 e 3 MPa, con punte locali di 4

MPa; da circa 9,50 m p.c. fino a fondo infissione la qc torna a crescere fino a circa 6 MPa;

- La resistenza laterale (f_s) presenta un andamento simile a quello della resistenza alla punta (q_c), sebbene con il picco sfasato per motivi litologici, con valori fino a 500 kPa in corrispondenza della profondità di circa 1 m p.c., per diminuire progressivamente nella colonna argillosa fino a 100÷150 kPa a 6,50 m dal p.c., per poi risalire fino a valori di 400÷500 kPa, sempre nella colonna argillosa, fino a fondo infissione (9,72 m dal p.c.);
- La pressione interstiziale (u) assume valori prossimi allo 0 fino a circa 2,5 m dal p.c., poi aumenta progressivamente nella colonna argillosa fino alla profondità di circa 6 m p.c. con valori di pressione dei pori che raggiungono 1500÷1800 kPa, poi si assesta a 1250 kPa fino a 7,5 m dal p.c. e torna ad aumentare fino a quasi 3000 kPa a fondo infissione.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 02:
 - Profondità indagata: 10,64 m dal p.c.;
 - Nei primi 70 cm circa dal p.c., elevati valori della resistenza alla punta (q_c), fino a circa 7 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da sabbia limosa e limo sabbioso (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino a fondo foro, si ha una drastica riduzione della q_c in presenza di argille, con q_c compresa mediamente fra 2,00 e 4,00 MPa, fino a raggiungere valori prossimi a 1,5 MPa in corrispondenza di argille poste a circa 2,00÷2,50 m dal p.c.;
 - La resistenza laterale (f_s) presenta un andamento simile a quello della resistenza alla punta (q_c), sebbene con il picco sfasato per motivi litologici, con valori di 250÷450 kPa nell'intervallo 0,75÷1,75 m dal p.c. costituito da argille e argille limose consistenti o molto consistenti, per diminuire ed assestarsi a valori di 100÷200 kPa nell'intervallo argilloso fino a circa 9,00 m dal p.c., per poi crescere nelle argille a valori medi di 300 kPa fino a fondo infissione (10,64 m dal p.c.);
 - La pressione interstiziale (u) assume valori prossimi allo 0 fino a circa 3 m dal p.c., poi aumenta progressivamente nella colonna argillosa fino alla profondità di circa 9 m dal p.c. con valori di pressione dei pori che raggiungono 1250 kPa, poi si annulla a circa 9,25 m dal p.c. e torna ad aumentare fino a 250 kPa a fondo infissione.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 03:
 - Profondità indagata: 8,28 m dal p.c.;

- Nei primi 1,7 m da p.c., elevati valori della resistenza alla punta (q_c), con picco fino a circa 7 MPa alla profondità di 1 m dal p.c.. I primi 1,7 m di spessore sono costituiti prevalentemente da argille e limi argillosi (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino a fine infissione si ha una riduzione della q_c compresa in un intervallo tra 2 e 3 Mpa.
- La resistenza laterale (f_s) presenta andamento simile a quello della resistenza alla punta (q_c), sebbene il picco presente nel livello superiore si riscontri ad una profondità di 1,5 metri per motivi litologici con una f_s di circa 500kPa; oltre 1,7 m l'andamento della resistenza laterale diminuisce rispetto al livello soprastante oscillando tra 150 kPa e 250 kPa fino a fondo infissione (8,28 m dal p. c.);
- La pressione interstiziale (u) assume valori prossimi a 0 kPa fino a circa 2,7 m dal p.c., successivamente aumenta nella colonna argillosa fino a valori di 1.375 kPa alla profondità di 6,2 m dal p.c. per poi oscillare fino a fondo infissione (8,28 m dal p.c.) su valori compresi tra 1.100 e 1.300 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 04:
 - Profondità indagata: 9,22 m dal p.c.;
 - Nei primi 50 cm circa dal p.c., elevati valori della resistenza alla punta (q_c), superiori a circa 5 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da sabbia e sabbia limosa (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino a fondo foro, si ha una drastica riduzione della q_c in presenza di argille, con q_c compresa mediamente fra 2,00 e 2,50 MPa, fino a raggiungere valori inferiori a 1 MPa in corrispondenza di argille con contenuto organico discreto a circa 2,00÷2,50 m dal p.c.;
 - La resistenza laterale (f_s) presenta un andamento simile a quello della resistenza alla punta (q_c), sebbene con il picco sfasato per motivi litologici, con valori fino a 400 kPa nell'intervallo argilloso 0,50÷1,00 m p.c., per diminuire fino a 100 kPa a 2,50 m dal p.c. nell'intervallo con discreto contenuto organico, per poi assestarsi a valori di 100÷250 kPa nella colonna argillosa sottostante fino a fondo infissione (9,22 m dal p.c.);
 - La pressione interstiziale (u) assume valori negativi in corrispondenza dell'intervallo 1,00÷2,80 m dal p.c., fino ad aumentare progressivamente nella colonna argillosa fino a fondo infissione con valori di pressione dei pori che raggiungono 300 kPa.

- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 05:
 - Profondità indagata: 10,28 m dal p.c..
 - Nei primi 1,5 m dal p.c. si rilevano elevati valori della resistenza alla punta, soprattutto in prossimità del piano di campagna dove qc raggiunge 5,7 MPa (presenza di suolo compatto); dalla profondità di 1,5 m dal p.c. fino a fondo infissione (10,28 m dal p.c.), i valori della resistenza alla punta rimangono abbastanza costanti, con valori più bassi rispetto al livello soprastante, oscillando da 0,7 a 3,6 MPa; le oscillazioni più marcate corrispondono a livelli argillosi più compatti.
 - La resistenza laterale (fs) presenta andamento simile alla resistenza alla punta (qc), dal piano di campagna la fs inizia a crescere fino a raggiungere il valore massimo a 1,0 dal p.c. (350 kPa); da 1,5 m dal p.c. risale fino a 280 kPa alla profondità di 3,7 m dal p.c. per poi diminuire e oscillare tra 100 e 205 kPa fino alla profondità di 8,0 m dal p.c.; a partire da tale quota si ha un nuovo aumento fino a 280 kPa a 8,5 m dal p.c.; da questa profondità la resistenza laterale (fs) diminuisce leggermente per poi risalire da 10 m dal p.c. fino a fondo infissione (10,28 m dal p.c.), dove raggiunge i 290 kPa.
 - La pressione interstiziale (u) a partire dal piano di campagna è compresa tra 480 e 100 kPa fino alla profondità di 1,3 m dal p.c., poi si stabilizza intorno a 100 kPa fino alla profondità di 3,0 m dal p.c.; da tale quota la pressione cresce fino ad arrivare a 1.050 kPa (3,6 m p.c.) per poi subire una forte diminuzione a 3,7 m dal p.c. (190 kPa.); risale poi rapidamente oscillando tra 450 e 900 kPa fino alla profondità di 8,0 m dal p.c. dove arriva ad un valore di 1.050 kPa; da 8,0 m dal p.c. la u diminuisce drasticamente arrivando a raggiungere 10 kPa alla profondità di 8,1 m dal p.c., risale poi fino a fondo infissione dove raggiunge il valore massimo pari a 1.600 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 06:
 - Profondità indagata: 11,18 m dal p.c.;
 - Nei primi 1,4 m p.c. circa da p.c., si registrano elevati valori della resistenza alla punta (qc), con valori fino a circa 7,5 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da sabbia e suolo molto compatto (SBT, Robertson, 2010); da tale profondità fino ad una profondità di 6,6 m dal p.c., si ha una drastica riduzione della qc per la presenza di argille, con qc compresa mediamente fra 1,5 e 3,5 Mpa; da 6,6 a 6,9 m dal p.c. è presente un livello di argilla e limo argilloso che produce un aumento della

resistenza alla punta che raggiungere valori di 5,4 Mpa, fino a fondo infissione l'andamento della qc ritorna su valori compresi tra 1,4 e 3 Mpa fino a fondo infissione (11,18 m dal p.c.);

- La resistenza laterale (fs) presenta un andamento molto simile alla resistenza alla punta (qc) eccetto che per i primi 0,50 m dal p.c., dove si riscontrano valori iniziali della fs bassi per la presenza di sabbie, valori compresa tra 70 e 230 kPa per salire a valori molto più alti fino alla profondità di 1,0 m dal p.c. dove la fs che raggiunge circa 470 kPa per poi decrescere, fino ad una profondità di 1,4 m dal p.c., per ritornare a valori di 200 kPa; da 1,4 a 6,6 m dal p.c. la resistenza laterale (fs) ha oscillazioni che variano da 100 a 230 kPa, successivamente si ha un repentino aumento della fs, tra 6,6 e 6,9 m, dove la fs raggiunge i 320 kPa per la presenza di limi argillosi per poi ritornare su valori compresi tra i 100 ed i 250 kPa fino alla profondità di fine infissione (11,18 m dal p.c.);
- la pressione interstiziale (u) assume valori prossimi allo 0 fino a 3,6 m dal p.c., successivamente aumenta progressivamente fino alla profondità di 6,6 m p.c. dove raggiunge il valore massimo di 1.700 kPa, poi subisce un forte calo alla profondità di 8,3 m dal p.c. (300 kPa) per poi risalire a valori compresi tra 500 e 850 kPa fino a fondo infissione (11,18 m dal p.c.).
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 07:
 - Profondità indagata: 8,30 m dal p.c.;
 - dal piano di campagna fino alla profondità di 1,5 m da p.c. si rilevano elevati valori di resistenza alla punta (qc), che oscillano tra 3,5 e 7,5 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), da tale profondità fino a circa 3,4 m dal p.c. i valori di resistenza alla punta (qc) oscillano su valori compresi tra 1 e 2 MPa per la presenza di argille; dalla profondità di circa 3,4 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (8,30 m dal p.c.) si ha un incremento della resistenza alla punta che oscilla su valori compresi tra 1,5 e 3,1 MPa, valori corrispondenti ad argille.
 - Dalla piano di campagna fino alla profondità di 1,5 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (fs) crescono raggiungendo valori di 375 kPa, successivamente i valori scendono fino alla profondità di circa 2,2 m dal p.c. raggiungendo i 100 kPa; dalla

profondità di 2,2 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (8,30 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale oscillano tra 120 kPa e 295 kPa.

- I valori della pressione interstiziale (u) rimangono nulli fino alla profondità 3,4 m dal p.c., profondità oltre la quale la pressione interstiziale (u) inizia a crescere fino alla profondità di 8,2 m dal p.c. raggiungendo valori di 1100 kPa, successivamente i valori di pressione interstiziale diminuiscono ed oscillano su valori compresi tra 510 e 630 kPa fino alla profondità di fine infissione (8,30 m dal p.c.).
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 08:
 - Profondità indagata: 7,22 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (qc) aumentano dal piano di campagna fino alla profondità di 1,1 m dal p.c. raggiungendo valori di 7,1 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), da tale profondità fino a circa 2,7 m dal p.c. i valori di resistenza alla punta (qc) scendono raggiungendo valori di 1,1 MPa per la presenza di argille; dalla profondità di circa 2,7 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (7,22 m dal p.c.) la resistenza alla punta (qc) oscilla su valori compresi tra 1,2 e 3,1 MPa, valori corrispondenti ad argille.
 - Dal piano di campagna fino alla profondità di 1,8 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (fs) crescono raggiungendo valori di 500 kPa, successivamente i valori scendono fino alla profondità di circa 3,0 m dal p.c. raggiungendo i 130 kPa; dalla profondità di 3,0 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (7,22 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale oscillano tra 120 kPa e 230 kPa.
 - I valori della pressione interstiziale (u) rimangono bassi fino alla profondità di 1,8 m dal p.c., profondità oltre la quale la pressione interstiziale (u) inizia a crescere per poi stabilizzarsi su valori che oscillano tra 100 e 300 kPa fino alla profondità di 3,3 m dal p.c.; dalla profondità di 3,3 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) crescono fino alla profondità di 4,1 m dal p.c., profondità oltre la quale, i valori di resistenza alla punta (u) si stabilizzano e oscillando tra 750 e 1200 kPa fino alla profondità di fine infissione (7,22 m dal p.c.).
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 09:
 - Profondità indagata: 7,17 m dal p.c.;

- I valori di resistenza alla punta (q_c) aumentano dal piano di campagna fino alla profondità di 0,6 m dal p.c. raggiungendo valori di 6,0 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), da tale profondità fino a circa 2,1 m dal p.c. i valori di resistenza alla punta (q_c) scendono raggiungendo valori di 1,5 MPa per la presenza di argille; dalla profondità di circa 2,1 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (7,17 m dal p.c.) la resistenza alla punta (q_c) oscilla su valori compresi tra 1,5 e 3,1 MPa, valori corrispondenti ad argille.
- Dalla piano di campagna fino alla profondità di 1,1 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (f_s) crescono per poi oscillare su valori compresi tra 240 e 350 kPa, successivamente i valori scendono fino alla profondità di circa 2,3 m dal p.c. raggiungendo i 160 kPa; dalla profondità di 2,3 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (7,17 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale oscillano tra 140 kPa e 270 kPa.
- I valori della pressione interstiziale (u) rimangono bassi fino alla profondità di 2,8 m dal p.c., profondità oltre la quale la pressione interstiziale (u) inizia a crescere per fino alla profondità di 4,7 m dal p.c. raggiungendo valori di circa 1375 kPa; dalla profondità di 4,7 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) calano bruscamente arrivando a valori di 750 kPa e successivamente risalgono fino alla profondità di 5,2 m dal p.c. dove i valori della pressione interstiziale (u) arrivano a circa 1100 kPa; dalla profondità di 5,2 m dal p.c. la pressione interstiziale (u) diminuisce fino a valori di 650 kPa, successivamente i valori di pressione interstiziale (u) crescono fino alla profondità di 6,6 m dal p.c. raggiungendo i 1375 kPa; dalla profondità di 6,6 m dal p.c. i valori della pressione interstiziale (u) scendono fino 70 kPa alla profondità di 6,7 m dal p.c. , successivamente i valori di pressione interstiziale (u) risalgono fino a circa 800 kPa alla profondità di circa 7,0 m dal p.c.; alla profondità di 7,0 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) scendono fino a raggiungere valori negativi, per poi risalire fino alla profondità di fine infissione (7,17 m dal p.c.) raggiungendo i 500 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 10:
 - Profondità indagata: 10,09 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) aumentano dal piano di campagna fino alla profondità di 0,6 m dal p.c. raggiungendo valori di 6,0 MPa, corrispondenti ad un

intervallo costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), da tale profondità fino a circa 2,1 m dal p.c. i valori di resistenza alla punta (qc) scendono raggiungendo valori di 1,5 MPa per la presenza di argille; dalla profondità di circa 2,1 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (10,09 m dal p.c.) la resistenza alla punta (qc) oscilla su valori compresi tra 1,5 e 3,1 MPa, valori corrispondenti ad argille.

- Dalla piano di campagna fino alla profondità di 1,1 m dal p.c. i valori di resistenza laterale (fs) crescono per poi oscillare su valori compresi tra 240 e 350 kPa, successivamente i valori scendono fino alla profondità di circa 2,3 m dal p.c. raggiungendo i 160 kPa; dalla profondità di 2,3 m dal p.c. fino alla profondità di fine infissione (10,09 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale oscillano tra 140 kPa e 270 kPa.
- I valori della pressione interstiziale (u) rimangono bassi fino alla profondità di 2,8 m dal p.c., profondità oltre la quale la pressione interstiziale (u) inizia a crescere per fino alla profondità di 4,7 m dal p.c. raggiungendo valori di circa 1375 kPa; dalla profondità di 4,7 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) calano bruscamente arrivando a valori di 750 kPa e successivamente risalgono fino alla profondità di 5,2 m dal p.c. dove i valori della pressione interstiziale (u) arrivano a circa 1100 kPa; dalla profondità di 5,2 m dal p.c. la pressione interstiziale (u) diminuisce fino a valori di 650 kPa, successivamente i valori di pressione interstiziale (u) crescono fino alla profondità di 6,6 m dal p.c. raggiungendo i 1375 kPa; dalla profondità di 6,6 m dal p.c. i valori della pressione interstiziale (u) scendono fino 70 kPa alla profondità di 6,7 m dal p.c. , successivamente i valori di pressione interstiziale (u) risalgono fino a circa 800 kPa alla profondità di circa 7,0 m dal p.c.; alla profondità di 7,0 m dal p.c. i valori di pressione interstiziale (u) scendono fino a raggiungere valori negativi, per poi risalire fino alla profondità di fine infissione (10,09 m dal p.c.) raggiungendo i 500 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 12:
 - Profondità indagata: 8,19 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (qc) diminuiscono dal p.c. e in particolare a partire da circa il primo metro in cui si registrano valori di 2,5 MPa fino a circa 3,5 m dal p.c; in questo intervallo i valori minimi di resistenza alla punta (qc) osservati sono

corrispondenti alle argille e sono pari a circa 1,2 MPa. A partire da 3,5 m dal p.c. si osserva un leggero aumento del valore pari a circa 3,8 MPa seguito da un nuovo trend decrescente fino alla profondità di 6,5 m dal p.c. A questa profondità si registra un picco di valore massimo pari a circa 5,2 MPa, in corrispondenza di una lente di argilla limosa più compatta, e una successiva diminuzione del valore fino alla profondità di fine infissione, con valori massimi pari a 3 MPa.

- I valori di resistenza laterale (f_s) aumentano dal p.c. mantenendo un andamento costante con valori medi intorno a 100 KPa fino alla profondità di 2,5 m dal p.c., in cui si assiste a un trend crescente che mostra un picco di 300 KPa alla profondità di circa 3,7 m dal p.c., in corrispondenza di un importante strato di argille più compatto. A partire da circa 4,2 m dal p.c. si assiste a un andamento oscillatorio dei valori di resistenza laterale (f_s) con valori minimi pari a circa 120 KPa e valori massimi pari a circa 230 KPa alla profondità di 6,6 m dal p.c., in corrispondenza di una lente di argilla limosa più compatta all'interno dello strato argilloso.
- I valori della pressione interstiziale (u) rimangono bassi fino a circa 1,5 m dal p.c. e tendono ad aumentare fino a un massimo di circa 480 KPa alla profondità di 2,7 m dal p.c.. Da tale profondità si ha una diminuzione del valore di pressione interstiziale (u) fino a valori prossimi allo zero. A partire dalla profondità di 3,5 m dal p.c. si osservano forti oscillazioni: il valore di pressione interstiziale (u) aumenta fino a circa 1000 KPa e decresce fino a circa 70 KPa alla profondità di 3,8 m dal p.c.; da tale profondità si registra un ulteriore aumento pari a circa 1200 KPa, che decresce nuovamente a circa 700 KPa a 5,0 m dal p.c. Si osserva un ulteriore aumento che mostra valori di oltre 1200 KPa alla profondità di 6,0 m dal p.c.; a tale profondità si osserva un brusco calo con valori registrati prossimi allo zero che crescono nuovamente fino a circa 1000 KPa alla profondità di 6,5 m dal p.c. A partire da questa profondità si assiste a un ulteriore brusco calo dei valori di pressione interstiziale (u) fino a valori negativi, che mostrano poi un trend crescente fino a fondo infissione con valori massimi pari a circa 1100 KPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 13:
 - Profondità indagata: 10,39 m dal p.c.;
 - Nei primi 2,70 m circa dal p.c., si rilevano elevati valori della resistenza alla punta (q_c), che oscillano tra 2,8 e 6,7 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito

prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010), da tale profondità fino alla profondità di 8,4 m p.c. la resistenza alla punta oscilla da 1,6 a 4,1 Mpa per la presenza di argille; dalla profondità di 8,4 a 10,3 m dal p.c. la qc subisce un lieve aumento oscillando da 3,1 a 5,7 Mpa per la presenza di un livello più compatto di argilla; dalla profondità di 10,3 m dal p.c. la resistenza alla punta subisce un forte abbassamento fino alla profondità di fine infissione (10,39 m dal p.c.) dove raggiunge il valore di 1,5 Mpa.

- La resistenza laterale (f_s) fino alla profondità di 1,4 m dal p.c. tende a crescere, per poi stabilizzarsi e oscillare tra 390 e 590 kPa fino alla profondità 3,3 m dal p.c.; dalla profondità di 3,3 a 8,5 m dal p.c. la resistenza alla punta rimane abbastanza costante oscillando da 150 a 250 kPa; dalla profondità di 8,4 m dal p.c. si ha un aumento della resistenza alla punta, con valori di f_s che oscillano tra 280 e 520 kPa fino a fondo infissione (10,39 m dal p.c.).
- I valori della pressione interstiziale (u) aumentano dal piano di campagna fino ad una profondità di 4,1 m dal p.c., dove arrivano ad una pressione di circa 1200 kPa, per poi subire una fortissima diminuzione fino ad assumere valori negativi da 4,1 a 4,2 m dal p.c.; dalla profondità di 4,2 a 6,7 m dal p.c. si ha un continuo aumento della pressione interstiziale fino a valori di 1750 kPa per poi subire un forte calo alla profondità di 6,8 m dal p.c. dove raggiunge i 500 kPa; dalla profondità di 6,8 a 8,2 m la pressione interstiziale aumenta costantemente fino ad arrivare a valori di 1800 kPa per poi diminuire bruscamente alla profondità 8,2 m dal p.c. dove raggiunge i 300; da 8,2 m dal p.c. la pressione interstiziale aumenta molto repentinamente fino alla profondità di 8,7 m dal p.c. dove arriva a valori prossimi a 0 kPa; dalla profondità di 8,7 m dal p.c. la pressione aumenta costantemente fino a fondo infissione (10,39 m dal p.c.) raggiungendo pressioni interstiziali di 2250 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 15:
 - Profondità indagata: 8,23 m dal p.c..
 - Nei primi 0,6 m da p.c. si rileva un aumento costante dei valori di resistenza alla punta (qc) che da 1 MPa arrivano fino a circa 5,2 Mpa; ciò indica la presenza di suolo caratterizzato da sabbie e sabbie limose (SBT, Robertson, 2010). In seguito i valori di resistenza alla punta subiscono un calo costante fino alla profondità di 1,7 m dal p.c.

passando dal valore precedente (5,2 MPa) fino a circa 1,3 Mpa, indicando la presenza di suolo compatto. Successivamente, dalla profondità di 1,7 m dal p.c. fino a fondo infissione, si nota che i valori di resistenza alla punta assumono valori abbastanza costanti intorno ai 2÷2,5 MPa, con alcuni picchi fino a 3,5 MPa alla profondità di 4,5 m e 7,0 m dal p.c. (tale variazione è riconducibile alla presenza di argille).

- La resistenza laterale (f_s) presenta un andamento simile a quello della resistenza alla punta, ma con oscillazioni più significative: si nota infatti che da p.c. fino alla profondità di circa 0,5 m dal p.c. f_s assume valori pari a circa 50 kPa per poi aumentare fino a 250 kPa alla profondità di 1 m dal p.c.. Successivamente si registra una diminuzione abbastanza netta della resistenza laterale che raggiunge i 100 kPa alla profondità di circa 2 m dal p.c. per poi crescere costantemente fino a registrare valori di circa 300 kPa (a - 4,5 m). Da questo punto in poi il valore della resistenza laterale cala per attestarsi tra 200 kPa e 250 kPa fino a fondo infissione.
- La pressione interstiziale (u) ha inizialmente un trend crescente: intorno al p.c. assume valori pari a circa 50 kPa e tende poi ad aumentare superando anche 1.000 kPa alla profondità di circa 3,5 m dal p.c.. Successivamente si registrano valori che mostrano dei repentini crolli e altrettanto veloci risalite (valori negativi alla profondità di 4 m da p.c.). Fino alla profondità di 4,5 m dal p.c., si ha una risalita e la pressione interstiziale si stabilisce tra circa 750 kPa e 1.100 kPa fino alla profondità di circa 7 m dal p.c.. A questa profondità si registra un nuovo abbassamento che riporta, dopo pochi centimetri, i valori della pressione interstiziale prossimi allo zero. Al di sotto, fino a fondo infissione, la grandezza assume un valore di circa 900 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 16:
 - Profondità indagata: 8,23 m dal p.c..
 - Nei primi centimetri di suolo si nota un aumento repentino dei valori per quanto riguarda la resistenza alla punta (q_c) che si attestano a circa 4,5 Mpa fino alla profondità di circa 0,5 m dal p.c., presumibilmente per la presenza di suolo caratterizzato da sabbie e limi (SBT, Robertson, 2010). Da questo punto in poi si ha un aumento del valore della resistenza alla punta fino alla profondità di 1,0 m da p.c. (dove assume un valore pari a circa 7,5 Mpa) per poi avere un nuovo abbassamento a circa 1,4 m dal p.c. (circa 2,5 Mpa) probabilmente legato a suolo compatto (SBT,

Robertson, 2010); il valore resta invariato per i successivi 20 cm per la presenza di argilla e argilla sabbiosa (SBT, Robertson, 2010). Successivamente, il valore di resistenza alla punta subisce un aumento arrivando a circa 3 Mpa alla profondità di circa 2 m dal p.c., indicando la presenza di suolo compatto. Da qui fino a fondo infissione qc oscilla tra 2 Mpa e 3 Mpa, con alcuni picchi che sfiorano i 4 Mpa. (presenza di argille).

- La resistenza laterale (f_s) registra un iniziale aumento dei valori che arrivano fino a circa 500 kPa alla profondità di 1,0 m dal p.c., per poi calare a 100 kPa alla profondità di 1,5 m. Successivamente i valori oscillano intorno a 200 kPa fino alla profondità di 4,0 m dal p.c. per poi aumentare lievemente e attestarsi tra 200 kPa e 300 kPa fino a fondo infissione.
- La pressione interstiziale (u) presenta un aumento costante nel primo metro di suolo indagato (raggiunge circa 600 kPa). Al di sotto si registra un calo fino a 150 kPa a circa 2,5 m dal p.c. e un successivo aumento fino alla profondità di circa 4,3 m dal p.c. dove u raggiunge 600 kPa. Nei successivi 60 centimetri la pressione interstiziale scende repentinamente fino a un valore di circa 100 kPa per poi aumentare (850 kPa) e diminuire nuovamente (valore prossimo a 0 kPa). In seguito si osserva un lento e costante incremento della pressione interstiziale con la profondità: si arriva infatti a valori prossimi a 900 kPa alla profondità di 7,3 m dal p.c.. La pressione interstiziale diminuisce poi ancora una volta arrivando a 300 kPa e si riporta poi a circa 850 kPa alla profondità di circa 7,8 m dal p.c. e crolla a circa 400 kPa immediatamente dopo. Da questo punto fino a fondo infissione si ha un aumento costante fino a circa 700 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 17:
 - Profondità indagata: 9,32 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) mostrano un trend crescente a partire dal p.c. Fino alla profondità di circa 0,8 m dal p.c., registrando valori massimi pari a 9,0 MPa, in corrispondenza di uno strato costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010); a partire da tale profondità si assiste ad una progressiva diminuzione dei valori di resistenza alla punta (q_c), tipici delle argille, che si mantengono costanti a circa 2 MPa fino a 7,3 m dal p.c., profondità a partire dalla quale si osserva un ulteriore aumento dei valori con andamento oscillatorio che

mostrano valori massimi pari a circa 6 MPa in corrispondenza di uno strato argilloso più compatto alla profondità di circa 9,0 m dal p.c.

- I valori di resistenza laterale (f_s) mostrano un andamento crescente fino alla profondità di 1,5 m dal p.c., con valori massimi pari a circa 450 KPa corrispondenti a uno strato costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010); a partire da tale profondità si registra una diminuzione dei valori di resistenza laterale (f_s) che si mantengono costanti mediamente a circa 150 KPa fino alla profondità di circa 7,5 m dal p.c., in corrispondenza di un importante strato argilloso; a partire da 7,5 m dal p.c. si osserva un andamento oscillatorio con valori massimi pari a circa 450 KPa in corrispondenza di uno strato argilloso più compatto alla profondità di circa 9,0 m dal p.c.
- I valori della pressione interstiziale (u) mostrano un trend crescente a partire dal p.c. fino alla profondità di 7,3 m dal p.c., in cui si registra un valore superiore a 800 KPa; a partire da tale profondità si osserva un brusco calo del valore di pressione interstiziale (u) fino a circa 100 KPa, che tende ad aumentare nuovamente fino a fondo infissione raggiungendo valori massimi pari a circa 700 KPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 20:
 - Profondità indagata: 8,29 m dal p.c.;
 - I valori di resistenza alla punta (q_c) mostrano un andamento crescente a partire dal piano campagna fino al primo metro da questo, registrando valori massimi pari a circa 6 MPa, in corrispondenza di uno strato costituito prevalentemente da suolo denso e molto compatto (SBT, Robertson, 2010). A partire da 1,0 m dal p.c. si osserva un decremento dei valori di resistenza alla punta (q_c) che si stabilizzano mediamente a circa 2,0 MPa, valori caratteristici di substrati argillosi, fino a circa 6,0 m dal p.c.; a partire da tale profondità si registra un andamento oscillatorio dei valori di resistenza alla punta (q_c) che mostrano picchi massimi pari a circa 5 MPa, in corrispondenza di strati argillosi più compatti.
 - I valori di resistenza laterale (f_s) mostrano un andamento crescente a partire dal piano campagna fino a 1,5 m dal p.c., in cui si registrano valori pari a circa 300 KPa; a partire da tale profondità si assiste ad un decremento dei valori di resistenza laterale (f_s) che si stabilizzano presentando valori medi pari a circa 150 KPa fino a circa 6,0 m dal p.c. A

partire da tale profondità si registra un andamento crescente e oscillatorio con valori massimi registrati pari a circa 350 KPa alla profondità di circa 8,0 m dal p.c., in corrispondenza di uno strato di materiale argilloso più compatto; da tale profondità e fino a fondo infissione (8,29 m dal p.c.) i valori di resistenza laterale (f_s) diminuiscono nuovamente fino a circa 150 KPa.

- I valori della pressione interstiziale (u) mostrano un trend crescente a partire dal piano campagna fino a 4,0 m dal p.c., in cui si registrano valori pari a circa 700 KPa; a partire da tale profondità si osserva un brusco calo del valore a circa 450 KPa, che tende a risalire a partire da circa 4,5 m dal p.c. e ad assumere un andamento costante di 700 KPa fino a circa 6,0 m dal p.c.. A partire da 6,0 m dal p.c. si osserva un ulteriore decremento del valore di pressione interstiziale (u) con valori di circa 200 KPa che tendono a risalire a 500 KPa a circa 6,5 m dal p.c. Da tale profondità e fino a fondo infissione si assiste a un andamento oscillatorio dei valori della pressione interstiziale (u) che mostra picchi minimi pari a circa 500 KPa e picchi massimi pari a circa 1500 KPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 24:
 - Profondità indagata: 10,27 m dal p.c..
 - La resistenza alla punta (q_c) inizialmente ha valori elevati (circa 4 Mpa), per poi scendere a 1 MPa ad una profondità di 0,7 m dal p.c. e risalire fino alla profondità di 1,7 m dal p.c. raggiungendo 4,5 Mpa (gli alti valori registrati corrispondono a suolo compatto - SBT, Robertson, 2010); dalla profondità di 1,7 m i valori di q_c iniziano a risalire fino a 2,4 m dal p.c. per poi oscillare tra 1,5 MPa e 4,9 MPa, per la presenza di argille (SBT, Robertson, 2010); le variazioni più accentuate corrispondono a livelli di argilla molto compatta.
 - La resistenza laterale (f_s) da 90 kPa raggiunge a 1,5 m dal p.c. raggiunge valori di 310 kPa (in questo intervallo presente suolo compatto - SBT, Robertson, 2010); da questa profondità la f_s scende a valori di 100 kPa fino a 1,8 m dal p.c. per poi variare tra 100 e 190 MPa fino alla profondità di 4,3 m dal p.c.; a tale profondità i valori sono leggermente più alti (150÷360 kPa) fino a 9,3 m dal p.c. (presenza di un livello più coesivo tra 5,5 e 5,8 m dal p.c.); dalla profondità di 9,3 m dal p.c. si ha un aumento della resistenza laterale (f_s) fino alla profondità di fine infissione, con valori che compresi tra 200 e 360 kPa.

- La pressione interstiziale (u) in prossimità del piano di campagna fino a 3,3 m è molto bassa, successivamente inizia a salire fino ad una profondità di 4,6 m dal p.c. dove raggiunge 950 kPa; la pressione subisce poi una forte diminuzione arrivando a valori negativi; alla profondità compresa tra 4,6 e 5,7 m dal p.c. i valori di u variano molto passando da 900÷1.500 kPa a valori inferiori a 0 kPa; dalla profondità di 5,7 m dal p.c. la pressione cresce fino alla profondità di fine infissione dove raggiunge 1.850 kPa.
- Prova penetrometrica statica con piezocono CPTU 25:
 - Profondità indagata: 9,69 m dal p.c..
 - Nei primi 1,6 m circa dal p.c., si rilevano elevati valori della resistenza alla punta (q_c), che oscilla tra 1,5 e 4,3 MPa, corrispondenti ad un intervallo costituito prevalentemente da suolo compatto (SBT, Robertson, 2010); dalla profondità di 1,6 a 3,7 m dal p.c. la resistenza alla punta rimane pressoché costante oscillando tra 1,2 a 1,9 Mpa per la presenza di argille; dalla profondità di 3,7 fino a fine infissione (9,69 m dal p.c.) la q_c varia da 1,4 a 3,9 Mpa, i valori più alti corrispondono a piccoli livelli di argille più compatte.
 - Nel primo metro dal piano di campagna i valori della resistenza laterale (f_s), aumentano costantemente fino a raggiungere 340 kPa, successivamente decrescono fin alla profondità di 1,9 m p.c.; da qui fino a fondo foro (9,69 m dal p.c.) la resistenza alla punta subisce oscillazioni comprese tra 80kPa e 260 kPa per la presenza di piccoli livelli più o meno coesivi.
 - I valori della pressione interstiziale (u) sono prossimi allo zero kPa fino alla profondità di 2,5 m dal p.c., successivamente la pressione incrementa fino alla profondità 4,2 m p.c. dove raggiunge 1.100 kPa; alla profondità di 4,3 m dal p.c. la pressione interstiziale subisce una forte diminuzione arrivando a 30 kPa; dalla profondità di 4,3 m dal p.c. c'è un aumento fino a raggiungere 1.100 kPa per poi subire un forte abbassamento alla profondità di 5,1 m p.c., dove raggiunge 190 kPa; da questa profondità si registra un aumento fino a 1.200 kPa per poi subire un forte calo alla profondità di 7,6 m dal p.c. (30 kPa); successivamente. la u aumenta fino a fine infissione (9,69 m dal p.c.) raggiungendo i 1.000 kPa.

Anche nel caso delle CPTU i parametri geotecnici forniti dalla ditta esecutrice (con letture ogni centimetro) sono stati elaborati statisticamente sulla base del 5° percentile della

distribuzione dei dati per il calcolo del valore caratteristico.

8.3. Sondaggi a carotaggio continuo

I sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti con una sonda perforatrice cingolata; la stratigrafia e le fotografie delle cassette contenenti le carote sono riportate nell'allegato A. Dai risultati dei sondaggi a carotaggio continuo lungo il tracciato della nuova idrografia sono presenti, al di sotto di 0,1÷0,5 m di suolo vegetale, prevalentemente argille e limi, spesso compatti (soprattutto nei primi 2,0÷3,0 m di profondità dal p.c.). Nella porzione sud-orientale, è presente invece un primo strato costituito da terreno di riporto, soprastante a limi argillosi.

8.3.1. Standard Penetration Test

Come detto, durante la perforazione di alcuni sondaggi sono state realizzate prove Standard Penetration Test (S.P.T.) seguendo le norme di riferimento AGI e ASTM; i risultati delle prove S.P.T., riportati nella tabella 6, permettono di ricavare indicazioni sulle caratteristiche geotecniche del terreno incontrato attraverso correlazioni di natura empirica. Nel caso in esame, considerando la natura dei terreni e le altre indagini a disposizione (campioni indisturbati, prove penetrometriche), si è scelto di determinare l'angolo di attrito interno (utilizzando le formule del Japanese National Railway, di Owasaki & Iwasaki, Meyerhof, Peck-Hanson & Thornburn, Sowers e del Road Bridge Specification) e il modulo edometrico (con le correlazioni di Stroud & Butler³).

8.4. Prove geotecniche di laboratorio

Come detto al § 8.1 durante l'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati prelevati dei campioni indisturbati con fustella tipo Shelby per essere successivamente inviati al laboratorio Igetecma s.n.c. di Montelupo Fiorentino (Provincia di Firenze) per l'esecuzione delle prove geotecniche. Su tutti i campioni prelevati (tabella 5) sono state eseguite le seguenti prove:

- prove speditive di consistenza (ASTM 2488), comprensive della fotografia;
- determinazione del contenuto d'acqua (ASTM D 2216);
- analisi granulometrica per sedimentazione (Raccomandazione AGI 1994, ASTM D 422);

³ Valida per litotipi argillosi a media e bassa plasticità.

- analisi granulometrica per vagliatura per via umida (Raccomandazione AGI 1994, ASTM D 422);
- determinazione limiti di Atterberg (ASTM D 4318);
- determinazione del peso dell'unità di volume (ASTM D 2937, BS 1377 T15/D).

Inoltre, come mostrato nel dettaglio nelle tabelle 7 e 8 su alcuni di essi sono state effettuate le seguenti prove:

- determinazione del peso specifico dei granuli (CNR-UNI 10013, ASTM D 854);
- prova di compressione semplice E.L.L. ;
- prova triassiale non consolidata non drenata U.U. (ASTM D 2850)
- prova triassiale consolidata non drenata C.U.;
- prova triassiale consolidata drenata C.I.D. (Raccomandazione AGI 1994, ASTM D 5311);
- prova edometrica (ASTM D 2435);
- prova di taglio diretto (ASTM D 3080).

Sigla sondaggio	SPT	Litologia	f [°]	Eed [kPa]
S91	1	argilla limosa moderatamente consistente	29,0÷34,8	6.374,32÷7.649,19
	2	argilla deb. limosa consistente	32,7÷37,4	10.296,98÷12.356,38
S92	1	argilla limosa	27,8÷34,0	5.393,66÷6.472,39
	2	argilla molto consistente	29,5÷35,1	6.854,66÷8.237,59
S106	1	argilla e limo	28,4÷34,4	5.883,99÷7.060,79
	2	argilla e limo	33,2÷37,7	10.787,32÷12.944,78
S116	1	limo argilloso deb. sabbioso	26,0÷32,1	2.942,00÷3.530,39
	2	Limi e argille	35,8÷40,3	15.690,64÷18.828,77
S117	1	limo argilloso deb. sabbioso	25,2÷32,5	3.432,33÷4.118,79
	2	limo argilloso	36,4÷41,8	17.651,97÷21.182,36

Tabella 6- Parametri geotecnici ricavabili dai valori di N_{SPT}.

Sigla	Compressione semplice ELL	Triassiale UU	Triassiale CD	Edometrica*
S05-CI1	X			X
S05-CI2	X			X
S05-CI3	X			X

Sigla	Compressione semplice ELL	Triassiale UU	Triassiale CD	Edometrica*
S13-CI1				X
S14-CI1				X
S22-CI1		X	X	X
S26-CI1		X	X	X
S28-CI1	X			X
S28-CI2	X			X
S30-CI1				X
S34-CI1				X
S39-CI1				X
S71-CI1				X
S75-CI1				X
S76-CI1				X

Tabella 7 - Prove geotecniche di laboratorio "specifiche" eseguite sui campioni indisturbati del 2015.

* compresa la determinazione del peso specifico dei granuli.

Sigla	Compressione semplice ELL	Triassiale UU	Triassiale CU	Edometrica*	Taglio CD
S87-CI1	X			X	
S89-CI1	X			X	
S91-CI1			X	X	
S91-CI2			X	X	
S91-CI3	X			X	
S92-CI1		X	X	X	
S92-CI2		X			X
S92-CI3	X				
S93-CI1		X			X
S93-CI2	X				X
S93-CI3	X				X
S94-CI1	X				X
S94-CI2	X				X
S94-CI3					X
S95-CI1	X				X
S95-CI2					X
S96-CI1			X		X
S96-CI2	X				X

Sigla	Compressione semplice ELL	Triassiale UU	Triassiale CU	Edometrica*	Taglio CD
S96-CI3	X				X
S97-CI1			X		X
S97-CI2			X		X
S100-CI1			X		X
S100-CI2		X			X
S100-CI3			X		X
S101-CI1			X		X
S101-CI2			X		X
S103-CI1			X		X
S103-CI2		X			X
S106-CI1			X	X	
S106-CI2		X			X
S107-CI1	X			X	X
S107-CI2		X			X
S107-CI3			X		X
S109-CI1		X		X	X
S109-CI2			X	X	
S109-CI3	X			X	
S116-CI1	X			X	
S116-CI2			X		
S116-CI3	X				
S117-CI1			X	X	
S117-CI2	X			X	X
S117-CI3		X		X	
S121-CI1	X			X	X
S121-CI2				X	X
S121-CI3				X	X
S122-CI1		X			X
S122-CI2					X

Tabella 8 - Prove geotecniche di laboratorio "specifiche" eseguite sui campioni indisturbati del 2017.

* compresa la determinazione del peso specifico dei granuli.

I parametri geotecnici ottenuti dalle prove di laboratorio e riassunti nella tabella riportata nell'allegato A (ultima pagina di ciascun certificato) sono stati elaborati

statisticamente sulla base del 5° percentile della distribuzione dei dati per il calcolo del valore caratteristico (si veda il § 10.2.1).

8.5. Indagini geofisiche

8.5.1. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

Per definire la categoria di sottosuolo, ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018, e quindi per la definizione dell'azione sismica locale e di progetto risulta necessario determinare la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio tra il bedrock sismico ed il piano di imposta delle fondazioni ($V_{s,eq}$). Nel caso in esame per determinare tale parametro sono state utilizzate n. 6 (sei) indagini sismiche con metodologia MASW, denominate MASW2, MASW5, MASW7, MASW8, MASW10 e MASW11 (ubicazione delle indagini in allegato), alcune di queste, come indicato nella tabella 9, sono state elaborate congiuntamente con un'indagine HVSR.

L'analisi della dispersione delle onde superficiali, abbinata all'indagine HVSR, ha permesso di calcolare il parametro $V_{s,eq}$, applicando la formula seguente:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad (3.2.1 \text{ NTC 2018})$$

Nella tabella 9 sono riportati i valori del parametro $V_{s,eq}$ ottenuti.

sigla	Intervento	$V_{s,eq}$ [m/s]
MASW02	Derivazione del Fosso Reale Tratto di nuova inalveazione del Fosso Reale	278
MASW05*	Derivazione del Fosso Reale	328
MASW07*	Duna Polo Scientifico (estremità NO)	341 (p.c.); 429 (-5,5 m p.c.)
MASW08*	Duna Polo Scientifico (estremità SE)	333
MASW10*	Nuova pista (estremità NO)	296
MASW11*	Tratto di nuova inalveazione del Fosso Reale (inizio)	311

Tabella 9 - Valori $V_{s,eq}$.

* associata una misura di sismica passiva HVSR realizzata al centro dello stendimento.

8.5.2. Sismica a rifrazione

Nella campagna di indagine del 2017 sono state realizzate 10 (dieci) indagini sismiche

a rifrazione in onde P e onde Sh denominate RIFR1,÷11. Per le opere in progetto sono state utilizzate la rifrazione RIFR2, RIFR3, RIFR4, RIFR5, RIFR6, RIFR7, RIFR9 e RIFR11.

Nella RIFR2 si rilevano due sismostrati principali, con contatto a circa 8,0 m dal p.c.; quello più profondo presenta una serie di anomalie con una zona a maggior velocità al centro, una possibile zona argillosa nella parte finale e un livello con incremento delle velocità delle onde Sh nella parte bassa della sezione. L'elaborazione dello stendimento RIFR3 mostra una prima unità caratterizzata da un aumento progressivo della velocità delle onde P con la profondità e una seconda unità, a circa 5,0 m dal p.c., con possibile presenza di livelli a minore compattazione nella parte alta e a maggiore compattazione nella parte bassa. Il rilievo della RIFR4 evidenzia un livello superficiale (5,0÷10,0 m dal p.c.) con velocità molto basse ed un livello sottostante dominato da una inversione di velocità. Nella sezione RIFR5 è visibile un passaggio, seppur non molto marcato, alla profondità di circa 9,0 m dal p.c., con un incremento progressivo della velocità delle onde P e Sh all'interno del primo orizzonte. La RIFR6 è in parte alterata dal rumore di fondo della limitrofa viabilità; è comunque visibile una interfaccia piuttosto netta a circa 8,0 m dal p.c. Alla medesima profondità si osserva un contatto nel rilievo RIFR7; all'interno dell'orizzonte più profondo è stata misurata un'inversione di velocità, posta a circa 20 m dal p.c.. L'elaborazione della RIFR9 ha individuato un primo livello con velocità delle onde Sh inferiori a 200 m/s e un secondo livello che, da 7,0÷8,0 m fino a 20 m dal p.c. è caratterizzato da una serie di inversioni di velocità.

8.5.3. Indagine sismica in foro downhole

Nei sondaggi S91, e S117 è stata svolta un'indagine sismica in foro di tipo *down-hole*; tale indagine prevede l'investigazione del terreno attraverso il posizionamento di un geofono tridimensionale all'interno di un foro di perforazione appositamente attrezzato. Questo tipo di indagine viene utilizzata per determinare la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m dal piano di imposta delle fondazioni (V_{seq}). Tale parametro risulta necessario, come detto, per individuare la categoria di sottosuolo, Ai sensi del § 7.11.3.4 delle NTC2018, e quindi per la definizione dell'azione sismica locale e di progetto. Per i dettagli operativi della metodologia di acquisizione dei dati, si rimanda al rapporto finale dell'indagine eseguita (Allegato C). L'elaborazione delle onde Sh e delle onde P mostra un progressivo aumento delle velocità con la profondità: nella DH-S91 si osserva un netto accrescimento alla

profondità di circa 8,50 m dal p.c.; nella DH-S117 sono presenti invece due gradini, rispettivamente a 4,50 e 12,5 m. Il valore della $V_{s,eq}$ calcolato utilizzando la formula seguente:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad (3.2.1 \text{ NTC 2018})$$

Nella tabella 10 è riportato sono riportati i valori delle $V_{s,eq}$, espressa in m/s, per ciascuna Down-Hole:

sigla	Intervento	$V_{s,eq}$ [m/s]
		da p.c.
S91-DH	Ponte area Polo Scientifico (pressi Baxter)	306
S117-DH	Ponte sul Fosso Reale nei pressi della Vasca di laminazione C	307

Tabella 10 - Valori $V_{s,eq}$.

8.5.4. Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)

La caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica di indagine sismica passiva HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio – Metodo di Nakamura) è finalizzata all'individuazione delle frequenze caratteristiche di risonanza di sito. Esse sono correlabili ai cambi litologici presenti sia all'interno della copertura che nell'ammasso roccioso: entrambi possono risultare passaggi litologici che generano fenomeni di possibile amplificazione della sollecitazione sismica.

Nella prova HVSr5 e nella prova HVSr11 non è stato rilevato un picco nell'intervallo di frequenza che abbia interesse ingegneristico. Nella prova HVSr7, non è stato rilevato un picco significativo segno evidente che non vi è un contrasto di impedenza rilevabile con questa metodologia. Nella prova HVSr8 è stato rilevato un picco a 0,41 Hz ma non vi è il rispetto delle condizioni del SESAME ne' per l'affidabilità della curva (solo due su tre) ne' per l'affidabilità del picco (solo quattro su sei). Infine nella prova HVSr10 analizzata per appena dodici minuti, il picco rilevato alla frequenza di 0,38 Hz appare poco attendibile anche per i criteri SESAME che non risultano accettabili per l'affidabilità della curva.

9. Sismicità e definizione dei parametri sismici

9.1. Zona sismica

La nuova classificazione sismica è stata approvata con Deliberazione della Giunta Regionale della Toscana n. 421 del 26 maggio 2014, che ha apportato modifiche (per accorpamento di alcuni Comuni) alla classificazione sismica regionale definita con la Delibera della Giunta Regionale della Toscana n. 878 dell'8 ottobre 2012. L'aggiornamento introdotto con quest'ultima delibera, redatto ai sensi dell'O.P.C.M. del 28 aprile 2006 n. 3519 si era reso necessario al fine di recepire le novità introdotte dall'entrata in vigore delle NTC e di rendere la classificazione sismica maggiormente aderente all'approccio "sito-dipendente" introdotto da tali norme. Inoltre, contestualmente all'entrata in vigore della nuova classificazione sismica, è stato approvato il regolamento 58/R del 22 ottobre 2012⁴, di attuazione dell'art. 117, comma 2, lettera g) della L.R. 3 gennaio 2005, n. 1 (Norme per il governo del territorio). I comuni di interesse per il presente studio sono inseriti nella zona sismica 3.

9.2. Parametri sismici

9.2.1. Aspetti generali

La stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido, viene definita tramite un approccio sito-dipendente. Come riportato al § 3.2 del D.M. 18 gennaio 2018 e al § C3.2 della Circolare C.S.LL.PP. n. 7/2019, è possibile fare riferimento all'*Allegato A* del D.M. 14 gennaio 2008 nel quale i parametri necessari per la definizione dell'azione sismica di progetto vengono calcolati attraverso le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento (nella *Tabella 1 - Allegato B* del medesimo decreto NTC2008 vengono forniti, per ciascuno dei 10.751 nodi della griglia che costituisce il reticolo, i valori di a_g , F_0 e T^*c , per nove valori del periodo di ritorno: 30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2.475 anni).

Nel presente studio si è utilizzato il software fornito dalla ditta GeoStru che permette di calcolare gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticale) delle azioni sismiche di progetto per un generico sito del territorio nazionale. Mediante questo

⁴ *Regolamento di attuazione dell'art. 117, comma 2, lettera g) della L.R. 3 gennaio 2005, n. 1 (Norme per il governo del territorio). Verifiche nelle zone a bassa sismicità. Determinazione del campione da assoggettare a verifica.*

programma è possibile, inserendo le coordinate e le caratteristiche progettuali del sito, ottenere direttamente i parametri relativi al computo dell'azione sismica di progetto.

9.2.2. Categoria di di sottosuolo (approccio semplificato)

Visto il valore della velocità equivalente delle onde di taglio calcolato dalle indagini sismiche (§ 8.5.2) al sito in oggetto si assegnano le seguenti categorie di sottosuolo:

- **categoria di sottosuolo C** per quanto riguarda il Fosso Reale, il Nuovo Canale di Gronda, il Nuovo Canale Lupaia Giunchi e il Collettore per scarico Cassa Orientale (*"Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s."* - da Tab. 3.2.II del D.M. 17 gennaio 2018 e § C3.2.2 della Circolare C.S.LL.PP. n. 7/2019).
- **categoria di sottosuolo B** per quanto riguarda il Collettore fognario che sottopassa la pista (*"Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s."* - da Tab. 3.2.II del D.M. 17 gennaio 2018 e § C3.2.2 della Circolare C.S.LL.PP. n. 7/2019).

9.2.3. Categoria topografica

In considerazione dell'ubicazione dell'area di progetto, ai sensi del § 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 e del § C.3.2.2 della Circolare C.S.LL.PP. n. 7/2019, al sito di intervento viene assegnata la **categoria topografica T1** (*superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$* , Tab. 3.2.III del D.M. 17 gennaio 2018), alla quale corrisponde un coefficiente di amplificazione topografica S_T pari a 1.0 (Tab. 3.2.V del decreto suddetto).

9.2.4. Parametri dell'azione sismica locale

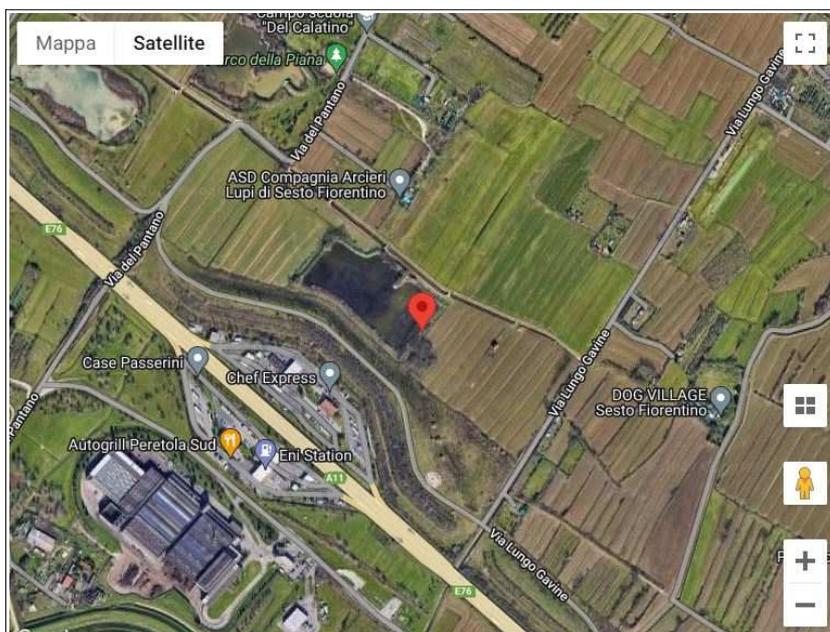
Per ricavare i valori dei parametri dell'azione sismica locale per l'area di progetto, si è utilizzato il programma fornito da *GeoStru S.r.l.* assegnando le coordinate geografiche WGS84. Per determinare gli spettri di risposta elastici del sito, tenuto conto degli effetti locali dovuti all'amplificazione sia stratigrafica che topografica, vengono assegnati determinati parametri

progettuali. Questi ultimi, per la definizione dell'azione sismica, sono adottati come segue, ai sensi del § 2.4 del D.M. 17 gennaio 2018 e del § C2.4 della Circolare n. 7/2019:

- **vita nominale di progetto** (V_N) 50 anni (*Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari*) per tutte le opere collegate all'idrografia esterna al sedime;
- **classe d'uso I** [*Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli*] per quanto riguarda il Nuovo Canale di Gronda e il Nuovo Canale Lupaia Giunchi, **classe d'uso II** riguardo il Fosso Reale, il Collettore per scarico Cassa Orientale e il Collettore fognario che sottopassa la pista;
- **coefficiente d'uso** (C_U) pari a 0,7 (per classe d'uso I) e a 1,0 (per classe d'uso II);
- **vita o periodo di riferimento per l'azione sismica** ($V_R = V_N * C_U$) pari a 50 anni (per V_N 50 anni e $C_U = 1,0$), e a 35 anni (per V_N 50 anni e $C_U = 0,7$).

Di seguito si riportano parametri e coefficienti sismici relativi a distinti settori riguardanti l'idrografia esterna al sedime.

9.2.4.1. Parametri dell'azione sismica locale (Fosso Reale)



Di seguito parametri e coefficienti sismici per interventi relativi a fronti di scavo e rilevati.

Tipo di elaborazione: Fronti di scavo e rilevati

Parametri sismici

Sito in esame.

latitudine: 43,821207
longitudine: 11,176904
Classe: 2
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1	ID: 19835	Lat: 43,8112	Lon: 11,1346	Distanza: 3567,536
Sito 2	ID: 19836	Lat: 43,8126	Lon: 11,2039	Distanza: 2365,349
Sito 3	ID: 19614	Lat: 43,8626	Lon: 11,2020	Distanza: 5021,212
Sito 4	ID: 19613	Lat: 43,8612	Lon: 11,1327	Distanza: 5686,580

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 50anni
Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 30 [anni]
ag: 0,048 g
Fo: 2,542
Tc*: 0,252 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 50 [anni]
ag: 0,058 g
Fo: 2,578
Tc*: 0,267 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 475 [anni]
ag: 0,134 g
Fo: 2,418
Tc*: 0,302 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 975 [anni]

ag: 0,171 g
Fo: 2,389
Tc*: 0,311 [s]

Coefficienti Sismici Fronti di scavo e rilevati

SLO:

Ss: 1,500
Cc: 1,660
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 0,704
Beta: 0,000

SLD:

Ss: 1,500
Cc: 1,620
St: 1,000
Kh: 0,041
Kv: 0,020
Amax: 0,846
Beta: 0,470

SLV:

Ss: 1,500
Cc: 1,560
St: 1,000
Kh: 0,076
Kv: 0,038
Amax: 1,970
Beta: 0,380

SLC:

Ss: 1,450
Cc: 1,540
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 2,430
Beta: 0,000

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50

Geostru

Coordinate WGS84
latitudine: 43.820250
longitudine: 11.175919

9.2.4.2. Parametri dell'azione sismica locale (Nuovo Canale di Gronda)



Tipo di elaborazione: Fronti di scavo e rilevati

Parametri sismici

Sito in esame.

latitudine: 43,8265938763897
longitudine: 11,1744806140527
Classe: 1
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1	ID: 19835	Lat: 43,8112	Lon: 11,1346	Distanza: 3623,810
Sito 2	ID: 19836	Lat: 43,8126	Lon: 11,2039	Distanza: 2824,452
Sito 3	ID: 19614	Lat: 43,8626	Lon: 11,2020	Distanza: 4569,154
Sito 4	ID: 19613	Lat: 43,8612	Lon: 11,1327	Distanza: 5101,649

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 35anni
Coefficiente cu: 0,7

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 30 [anni]
ag: 0,048 g
Fo: 2,541
Tc*: 0,252 [s]

Danno (SLD):
Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 35 [anni]
ag: 0,051 g
Fo: 2,552
Tc*: 0,256 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):
Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 332 [anni]
ag: 0,117 g
Fo: 2,460
Tc*: 0,298 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):
Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 682 [anni]
ag: 0,152 g
Fo: 2,405
Tc*: 0,306 [s]

Coefficienti Sismici Fronti di scavo e rilevati

SLO:
Ss: 1,500
Cc: 1,660
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 0,705
Beta: 0,000

SLD:
Ss: 1,500
Cc: 1,650
St: 1,000
Kh: 0,036
Kv: 0,018
Amax: 0,745
Beta: 0,470

SLV:
Ss: 1,500

Cc: 1,570
St: 1,000
Kh: 0,067
Kv: 0,033
Amax: 1,719
Beta: 0,380

SLC:

Ss: 1,480
Cc: 1,550
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 2,201
Beta: 0,000

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50

Geostru

Coordinate WGS84

latitudine: 43.825637

longitudine: 11.173495

9.2.4.3. Parametri dell'azione sismica locale (Nuovo Canale Lupaia Giunchi)



Tipo di elaborazione: Fronti di scavo e rilevati

Parametri sismici

Sito in esame.

latitudine: 43,816534
longitudine: 11,196314
Classe: 1
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1	ID: 19835	Lat: 43,8112	Lon: 11,1346	Distanza: 4983,452
Sito 2	ID: 19836	Lat: 43,8126	Lon: 11,2039	Distanza: 746,956
Sito 3	ID: 19614	Lat: 43,8626	Lon: 11,2020	Distanza: 5141,174
Sito 4	ID: 19613	Lat: 43,8612	Lon: 11,1327	Distanza: 7119,356

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 35anni
Coefficiente cu: 0,7

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 30 [anni]
ag: 0,048 g
Fo: 2,544
Tc*: 0,252 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 35 [anni]
ag: 0,050 g
Fo: 2,555
Tc*: 0,256 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 332 [anni]
ag: 0,116 g
Fo: 2,453
Tc*: 0,299 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 682 [anni]

ag: 0,151 g
Fo: 2,399
Tc*: 0,307 [s]

Coefficienti Sismici Fronti di scavo e rilevati

SLO:

Ss: 1,500
Cc: 1,660
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 0,700
Beta: 0,000

SLD:

Ss: 1,500
Cc: 1,650
St: 1,000
Kh: 0,035
Kv: 0,018
Amax: 0,740
Beta: 0,470

SLV:

Ss: 1,500
Cc: 1,560
St: 1,000
Kh: 0,066
Kv: 0,033
Amax: 1,708
Beta: 0,380

SLC:

Ss: 1,480
Cc: 1,550
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 2,187
Beta: 0,000

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50

Geostru

Coordinate WGS84
latitudine: 43.815577
longitudine: 11.195329

9.2.4.4. Parametri dell'azione sismica locale (Collettore fognario sottopista)



Tipo di elaborazione: Stabilità dei pendii e fondazioni

Parametri sismici

Sito in esame.

latitudine: 43,818656
longitudine: 11,191079
Classe: 2
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito	ID	Lat	Lon	Distanza
Sito 1	ID: 19835	Lat: 43,8112	Lon: 11,1346	Distanza: 4602,908
Sito 2	ID: 19836	Lat: 43,8126	Lon: 11,2039	Distanza: 1226,879
Sito 3	ID: 19614	Lat: 43,8626	Lon: 11,2020	Distanza: 4962,571
Sito 4	ID: 19613	Lat: 43,8612	Lon: 11,1327	Distanza: 6655,051

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: B
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 50anni
Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento:	81	%
Tr:	30	[anni]
ag:	0,048	g
Fo:	2,543	
Tc*:	0,252	[s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento:	63	%
Tr:	50	[anni]
ag:	0,057	g
Fo:	2,579	
Tc*:	0,267	[s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento:	10	%
Tr:	475	[anni]
ag:	0,134	g
Fo:	2,414	
Tc*:	0,302	[s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento:	5	%
Tr:	975	[anni]
ag:	0,170	g
Fo:	2,388	
Tc*:	0,311	[s]

Coefficienti Sismici Stabilità dei pendii

SLO:

Ss:	1,200
Cc:	1,450
St:	1,000
Kh:	0,011
Kv:	0,006
Amax:	0,562
Beta:	0,200

SLD:

Ss:	1,200
Cc:	1,430
St:	1,000
Kh:	0,014
Kv:	0,007
Amax:	0,675
Beta:	0,200

SLV:

Ss: 1,200
Cc: 1,400
St: 1,000
Kh: 0,039
Kv: 0,019
Amax: 1,574
Beta: 0,240

SLC:

Ss: 1,200
Cc: 1,390
St: 1,000
Kh: 0,049
Kv: 0,025
Amax: 2,005
Beta: 0,240

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50

Geostru

Coordinate WGS84

latitudine: 43.817699

longitudine: 11.190094

Tipo di elaborazione: Fronti di scavo e rilevati

Parametri sismici

Sito in esame.

latitudine: 43,818656

longitudine: 11,191079

Classe: 2

Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1 ID: 19835 Lat: 43,8112 Lon: 11,1346 Distanza: 4602,908

Sito 2 ID: 19836 Lat: 43,8126 Lon: 11,2039 Distanza: 1226,879

Sito 3 ID: 19614 Lat: 43,8626 Lon: 11,2020 Distanza: 4962,571

Sito 4 ID: 19613 Lat: 43,8612 Lon: 11,1327 Distanza: 6655,051

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: B

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 50anni

Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 30 [anni]
ag: 0,048 g
Fo: 2,543
Tc*: 0,252 [s]

Danno (SLD):
Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 50 [anni]
ag: 0,057 g
Fo: 2,579
Tc*: 0,267 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):
Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 475 [anni]
ag: 0,134 g
Fo: 2,414
Tc*: 0,302 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):
Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 975 [anni]
ag: 0,170 g
Fo: 2,388
Tc*: 0,311 [s]

Coefficienti Sismici Fronti di scavo e rilevati

SLO:

Ss: 1,200
Cc: 1,450
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 0,562
Beta: 0,000

SLD:

Ss: 1,200
Cc: 1,430
St: 1,000
Kh: 0,032
Kv: 0,016
Amax: 0,675
Beta: 0,470

SLV:

Ss: 1,200

Cc: 1,400
St: 1,000
Kh: 0,061
Kv: 0,030
Amax: 1,574
Beta: 0,380

SLC:

Ss: 1,200
Cc: 1,390
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 2,005
Beta: 0,000

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50
Geostru

Coordinate WGS84
latitudine: 43.817699
longitudine: 11.190094

9.2.4.5. Parametri dell'azione sismica locale (Collettore cassa orientale)



Tipo di elaborazione: Stabilità dei pendii e fondazioni

Parametri sismici

Sito in esame.

latitudine: 43,81783
longitudine: 11,195732
Classe: 2
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1	ID: 19835	Lat: 43,8112	Lon: 11,1346	Distanza: 4956,280
Sito 2	ID: 19836	Lat: 43,8126	Lon: 11,2039	Distanza: 873,648
Sito 3	ID: 19614	Lat: 43,8626	Lon: 11,2020	Distanza: 5002,087
Sito 4	ID: 19613	Lat: 43,8612	Lon: 11,1327	Distanza: 6985,681

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 50anni
Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 30 [anni]
ag: 0,048 g
Fo: 2,544
Tc*: 0,252 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 50 [anni]
ag: 0,057 g
Fo: 2,580
Tc*: 0,267 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 475 [anni]
ag: 0,134 g
Fo: 2,412
Tc*: 0,302 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 975 [anni]

ag: 0,170 g
Fo: 2,387
Tc*: 0,311 [s]

Coefficienti Sismici Stabilità dei pendii

SLO:

Ss: 1,500
Cc: 1,660
St: 1,000
Kh: 0,014
Kv: 0,007
Amax: 0,701
Beta: 0,200

SLD:

Ss: 1,500
Cc: 1,620
St: 1,000
Kh: 0,017
Kv: 0,009
Amax: 0,842
Beta: 0,200

SLV:

Ss: 1,500
Cc: 1,560
St: 1,000
Kh: 0,048
Kv: 0,024
Amax: 1,965
Beta: 0,240

SLC:

Ss: 1,460
Cc: 1,540
St: 1,000
Kh: 0,060
Kv: 0,030
Amax: 2,435
Beta: 0,240

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50

Geostru

Coordinate WGS84

latitudine: 43.816873

longitudine: 11.194747

Tipo di elaborazione: Fronti di scavo e rilevati

Parametri sismici

Sito in esame.

latitudine: 43,81783
longitudine: 11,195732
Classe: 2
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1	ID: 19835	Lat: 43,8112	Lon: 11,1346	Distanza: 4956,277
Sito 2	ID: 19836	Lat: 43,8126	Lon: 11,2039	Distanza: 873,642
Sito 3	ID: 19614	Lat: 43,8626	Lon: 11,2020	Distanza: 5002,098
Sito 4	ID: 19613	Lat: 43,8612	Lon: 11,1327	Distanza: 6985,688

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 50anni
Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 30 [anni]
ag: 0,048 g
Fo: 2,544
Tc*: 0,252 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 50 [anni]
ag: 0,057 g
Fo: 2,580
Tc*: 0,267 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 475 [anni]
ag: 0,134 g
Fo: 2,412
Tc*: 0,302 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 975 [anni]

ag: 0,170 g
Fo: 2,387
Tc*: 0,311 [s]

Coefficienti Sismici Fronti di scavo e rilevati

SLO:

Ss: 1,500
Cc: 1,660
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 0,701
Beta: 0,000

SLD:

Ss: 1,500
Cc: 1,620
St: 1,000
Kh: 0,040
Kv: 0,020
Amax: 0,842
Beta: 0,470

SLV:

Ss: 1,500
Cc: 1,560
St: 1,000
Kh: 0,076
Kv: 0,038
Amax: 1,965
Beta: 0,380

SLC:

Ss: 1,460
Cc: 1,540
St: 1,000
Kh: 0,000
Kv: 0,000
Amax: 2,435
Beta: 0,000

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50

Geostru

Coordinate WGS84

latitudine: 43.816873

longitudine: 11.194747

10. Modellazione geologica, geotecnica e liquefazione (Fosso Reale)

10.1. Modello geologico del sottosuolo

Le indagini descritte al capitolo precedente permettono di identificare nell'intera area oggetto della presente relazione geologica (quindi lungo il "corridoio" definito dal nuovo tracciato di inalveazione del Fosso Reale e dell'area di laminazione B, in corrispondenza dell'area di laminazione A, lungo il percorso della derivazione del Fosso Reale), un intervallo superficiale, limitato ai primi 2,0÷2,5 m di spessore dal p.c., costituito prevalentemente da limo con argilla debolmente sabbioso e più raramente anche ghiaioso, nel quale la frazione granulare è limitata al massimo al 10% del totale della granulometria (tale frazione granulare è molto spesso costituita da concrezioni carbonatiche). In questo contesto il sottosuolo interessato dalle opere in oggetto può essere considerato, ai fini della modellazione geologica, come un unico strato sulla base dell'analisi litologica e stratigrafica, integrando i dati dei sondaggi con le analisi granulometriche e le prove penetrometriche (CPT). Dall'alto verso il basso, al di sotto di uno spessore medio di circa 0,30 m di suolo vegetale, è possibile individuare la seguente litologia:

- da 0,20÷0,40 a (almeno) 15,0 m dal p.c.: argilla limosa (argilla con limo) e limo argilloso (limo con argilla), localmente debolmente sabbiosi, di colore prevalentemente nocciola o bruno, con venature grigio-verdastre, con presenza variabile di concrezioni carbonatiche e di noduli di alterazione di Fe/Mn; da consistenti a molto consistenti; localmente, presenza di sottili intervalli a granulometria mista coesiva-incoerente (limo sabbioso, sabbia limosa, raramente sabbia pulita), soprattutto nella parte più superficiale dello strato (nei primi 2-3 m dal p.c), in corrispondenza delle CPT01, CPT02, CPT06 e, specialmente, CPT03 e CPT07.

A partire da profondità di 20÷25 m dal p.c. (circa 20÷15 m s.l.m.), fino ad almeno 50÷65 m dal p.c. si incontrano, nei pressi della deviazione del nuovo tratto di inalveazione del Fosso Reale (in S91, vicino allo stabilimento della Baxter Manufacturing S.p.A., e nei sondaggi profondi eseguiti presso il complesso del Polo Scientifico Universitario) limi argillosi con ghiaia con elementi di dimensioni centimetriche di natura calcarea, calcarea-marnosa, calcarea-arenacea, o di ghiaia e sabbia grossolana in matrice limosa-argillosa. Intervalli di un paio di metri di spessore costituiti da argilla limosa con ghiaia poligenica si rinvennero anche nei

sondaggi profondi realizzati presso la discarica di Case Passerini (e quindi nelle vicinanze della derivazione del Fosso Reale), a partire dalla profondità di circa 30 m dal p.c. (circa 5÷10 m s.l.m.).

10.2. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni presenti nel volume significativo e definizione del modello geotecnico di sottosuolo

10.2.1. Aspetti generali

Secondo l'EuroCodice 7 (EC7), il valore caratteristico è il *valore al quale è associata una prefissata probabilità di non superamento*, per una serie teoricamente illimitata di valori. Significa, quindi, che solo una percentuale di valori, pari alla probabilità prefissata, risulterà inferiore al valore caratteristico. Con riferimento all'EC7, il valore *soglia* di probabilità di non superamento è il 5% (5° percentile o frattile).

Nelle NTC 2018 per valore caratteristico di un parametro s'intende *una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato (§ 6.2.2. del D.M. 17 gennaio 2018 e del § C6.2.2 della Circolare n. 7/2019)*. Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire a una scelta corretta dei valori caratteristici appare giustificato, secondo la Circolare, il riferimento a valori prossimi ai *valori medi* quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno (come nel caso di fondazioni superficiali, fondazioni su pali relativamente alla resistenza laterale, verifiche di stabilità, opere di contenimento, di scatolari, di paramenti in terre rinforzate associati a rilevati stradali), mentre valori prossimi ai *valori minimi* dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno (come nel caso di fondazioni su pali relativamente alla resistenza di punta).

Per il progetto in questione, per il quale si possono prevedere compensazioni sia stratigrafiche che strutturali, le NTC indicano l'assunzione, come già accennato, di valori caratteristici prossimi al *valore medio* dei parametri geotecnici (unica deroga a questa assunzione è data dall'adozione di valori caratteristici prossimi ai *minimi* (riferimento al valore del 5° percentile) dei parametri geotecnici per quelle condizioni di rottura localizzata).

10.2.2. Modello geotecnico

Considerando la tipologia e l'estensione delle opere e viste le indagini a disposizione, si ritiene opportuno definire un modello geotecnico distinto per ognuno degli interventi; nei paragrafi seguenti si riportano pertanto i valori caratteristici dei parametri geotecnici per ciascuna delle opere principali.⁵

10.2.2.1. Tratto di nuova inalveazione del Fosso Reale (a nord della nuova pista) e area di laminazione B

Con riferimento al modello geologico descritto al § 10.1, in funzione dell'opera in progetto e del relativo volume significativo, si riportano di seguito i valori caratteristici dei parametri geotecnici per lo strato individuato (argilla limosa e limo argilloso):

- peso di volume $\gamma = 19,33 \text{ kN/m}^3$ (da media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni a disposizione);
- coesione non drenata $c_u = 79,70 \text{ kPa}$ (da elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati);
- angolo di attrito interno $f = 19,51^\circ$ (da elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati);
- coesione drenata $c' = 7,39 \text{ kPa}$ (da elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati);
- modulo edometrico $E_d = 9.708,58 \text{ kPa}$ (da elaborazione statistica dei dati delle prove penetrometriche, con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove edometriche).

10.2.2.2. Area di laminazione A

Con riferimento al modello geologico descritto al § 10.1, in funzione dell'opera in progetto e del relativo volume significativo, si riportano di seguito i valori caratteristici dei parametri geotecnici per lo strato individuato (argilla limosa e limo argilloso):

- peso di volume $\gamma = 19,55 \text{ kN/m}^3$ (da media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni a disposizione per l'opera in oggetto);

⁵ Per quanto riguarda il modulo edometrico il valore caratteristico riportato nelle tabelle del § 10.2.1 è rappresentativo del singolo strato individuato per il modello geologico e geotecnico. Sarà cura del progettista geotecnico attribuire eventuali ulteriori valori del modulo edometrico a strati di spessore inferiore per il calcolo dei cedimenti.

- coesione non drenata $c_u = 54,42$ kPa (da elaborazione statistica dei risultati della CPT07);
- angolo di attrito interno $f = 21,50^\circ$ (da prova di taglio diretto eseguita sul campione S88-CI1);
- coesione drenata $c' = 10,60$ kPa (a prova di taglio diretto eseguita sul campione S88-CI1);
- modulo edometrico $E_d = 9.708,58$ kPa (da elaborazione statistica dei dati delle prove penetrometriche con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove edometriche).

10.2.2.3. Derivazione del Fosso Reale

Con riferimento al modello geologico descritto al § 10.1, in funzione dell'opera in progetto e del relativo volume significativo, si riportano di seguito i valori caratteristici dei parametri geotecnici per lo strato individuato (argilla limosa e limo argilloso):

- peso di volume $\gamma = 19,38$ kN/m³ (da media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni a disposizione);
- coesione non drenata $c_u = 51,64$ kPa (da elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati);
- angolo di attrito interno $f = 16,02^\circ$ (da elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati);
- coesione drenata $c' = 7,24$ kPa (da elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati);
- modulo edometrico $E_d = 9.855,68$ kPa (da elaborazione statistica dei dati delle prove penetrometriche con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove edometriche).

10.2.2.4. Tratto di nuova inalveazione del Fosso Reale (tra nuova pista e A11)

Con riferimento al modello geologico descritto al § 10.1, in funzione dell'opera in progetto e del relativo volume significativo, si riportano di seguito i valori caratteristici dei parametri geotecnici per lo strato individuato (argilla limosa e limo argilloso):

- peso di volume $g = 19,50$ kN/m³ (da media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni a disposizione);

- coesione non drenata $c_u = 48,26$ kPa (da elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati);
- angolo di attrito interno $f = 15,48^\circ$ (da elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati);
- coesione drenata $c' = 4,93$ kPa (da elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati);
- modulo edometrico $E_d = 9.708,58$ kPa (da elaborazione statistica dei dati delle prove penetrometriche);
- modulo edometrico $E_d = 7.300$ kPa (per carico massimo – ipotizzato - di riferimento dalla prova edometrica eseguita sul campione S71/C1 per carico pari a 93,3 kPa).

10.2.3. Considerazioni sui terreni coesivi superficiali

L'analisi delle prove di laboratorio (prove edometriche) e delle prove in sito (prove penetrometriche statiche CPT e prove penetrometriche statiche con piezocono CPTU) ha mostrato la presenza di terreni superficiali con un elevato grado di sovraconsolidazione (OCR), concentrata soprattutto nei primi 1,50-2,00 metri di profondità dal piano campagna e dovuta a processi di essiccamento per temporanea emersione di sedimenti in ambiente di deposizione lacustre-palustre, processi che sono annoverati in letteratura fra le cause di preconsolidazione di terreni, fenomeno diverso da quello meccanico dovuto a precarico (con successiva erosione). Tali evidenze di sovraconsolidazione sono state registrate anche in corrispondenza di aree limitrofe a quella in oggetto in terreni coesivi del tutto analoghi quali argille limose e limi argillosi e sono documentate, ad esempio, presso l'area di Case Passerini per la progettazione del nuovo impianto di recupero energia da incenerimento rifiuti non pericolosi, presso l'area di Peretola-Castello (in G. Vannucchi "Analisi statistica e sperimentale della compressibilità dei terreni di fondazione nell'area di Peretola-Castello", Rivista Italiana di geotecnica, A.G.I., 1987), presso l'area del Polo Scientifico Universitario di Sesto Fiorentino.

Per quanto riguarda l'area di intervento, ma ciò è valido anche per le altre aree circostanti oggetto delle opere previste dal project review del Piano di Sviluppo Aeroportuale 2035, la sovraconsolidazione assume valori molto variabili sia in senso orizzontale che verticale. Le figure 3 e 4 seguenti mostrano, rispettivamente, la pressione di preconsolidazione (da prova edometrica) e l'OCR conseguente (rapporto fra la pressione di preconsolidazione e la pressione

verticale efficace alla profondità di campionamento del terreno) ricavate dai campioni di terreno prelevati dai sondaggi eseguiti nelle diverse aree interessate dalla realizzazione delle opere in progetto (argini della nuova inalveazione del Fosso Reale a nord e a sud della nuova pista, aree di laminazione A, derivazione del Fosso Reale), con i campioni posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico).

Nella figura 5, invece, i valori di OCR dei campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno delle diverse aree di intervento del sistema del Fosso Reale vengono posizionati alla profondità di prelievo, evidenziando quanto detto riguardo alla maggiore concentrazione della sovraconsolidazione nei primi 1,50÷2,00 m di spessore dal p.c..

Infine, nella tabella 11 seguente sono riportati valori statistici di alcuni parametri derivati dalle prove edometriche.

Tabella relativa ai parametri statistici di dati edometrici e OCR					
	Ind. ricompr. Cr	Ind. compress. Cc	Ind. rigonf. Cs	Press. precons. σ'_{vmax} (kPa)	OCR [-]
media aritm	0,04388	0,17976	0,06269	403,2	16,5
mediana	0,044	0,17622	0,06499	348,6	11,9
dev. std	0,016	0,038	0,018	212,81	12,88

Tabella 11 - Parametri statistici dei parametri dalle prove edometriche.

10.3. Liquefazione

Ai sensi del § 7.11.3.4 del D.M. 17 gennaio 2018, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti condizioni:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0.1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (*Cone Penetration Test – C.P.T.*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;

4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1a e b delle NTC 2018.

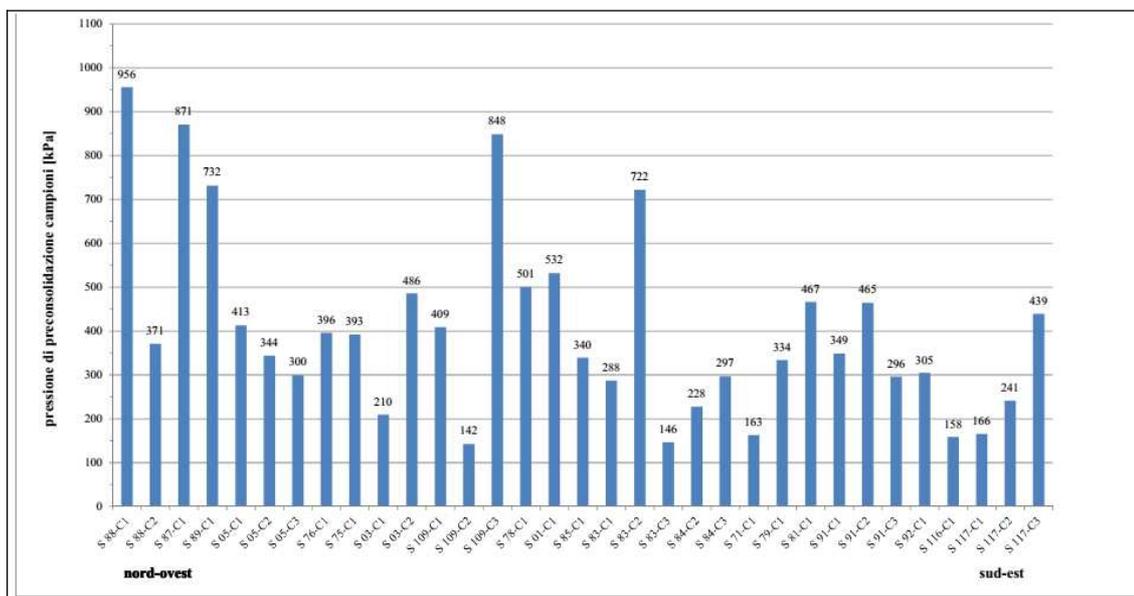


Figura 3 - Valori della pressione di preconsolidazione ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno delle aree oggetto della presente relazione, con i campioni posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico)

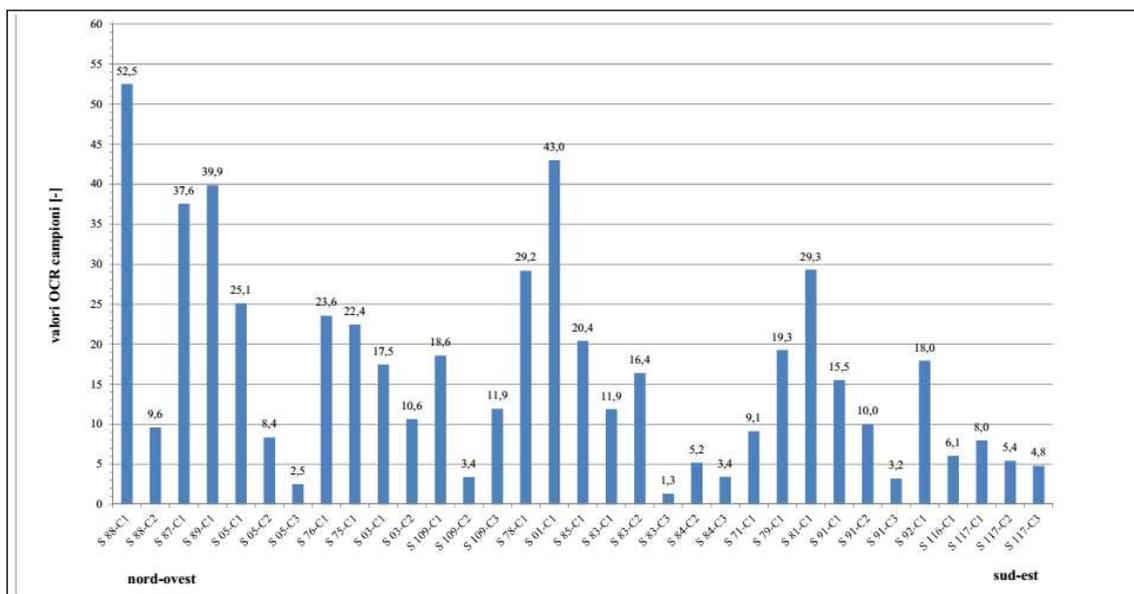


Figura 4 - Valori di OCR ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi realizzati all'interno delle aree di intervento, con i campioni posizionati da nord-ovest (a sinistra, nel grafico) a sud-est (a destra, nel grafico)

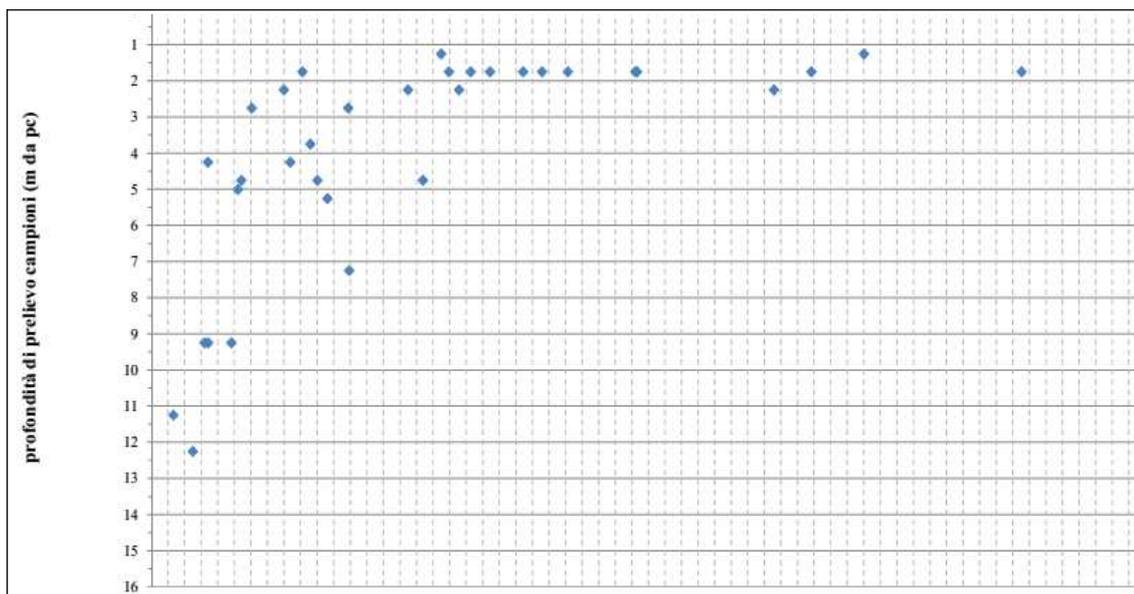


Figura 5 - Valori di OCR in funzione della profondità di prelievo (m dal p.c.), ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni dei sondaggi a disposizione per la presente relazione geologica.

Nel caso in esame, come riassunto nella tabella 12 seguente, è possibile non effettuare la verifica a liquefazione.

§ 7.11.3.4.2 DM 17-01-18	Criteri di esclusione	Valore	Verifica Liquefazione	Note
1	Accelerazione max attesa al p.c. < 0.1 g	0,134 g (SLV)	SI	Vedi § 9.2.4.1
2	Prof. falda > 15 m	>10,0 m	SI	Informazioni da sondaggi
3	$(N_1)_{60} > 30$ $q_{c1N} > 180$	-	-	-
4	Distribuzione granulometrica	Allegato A	NO	Distribuzioni prevalentemente al di fuori dei limiti

Tabella 12- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.

In merito al punto 4, si precisa che l'analisi delle curve granulometriche (si vedano i certificati di laboratorio nell'Allegato A) permette di affermare quanto segue:

- il fuso granulometrico più critico nei confronti della liquefazione (Tsuchida, 1970) per i campioni superficiali in corrispondenza dell'area di progetto è di circa il 60% (campione S117-C11);

- per la maggior parte dei campioni le curve cumulative presentano un passante sistematicamente superiore al 80%÷85% per la frazione fine, quindi si posizionano esternamente rispetto alla composizione granulometrica determinante la condizione di possibilità di liquefazione.

11. Modellazione geologica, geotecnica e liquefazione (Nuovo Canale di Gronda)

11.1. Modello geologico del sottosuolo

Il sottosuolo dell'area in oggetto può essere suddiviso, ai fini della modellazione geologica, in due strati individuati mediante l'analisi litologica e stratigrafica, integrando i dati dei sondaggi con le analisi granulometriche e le prove penetrometriche. Dall'alto verso il basso è possibile schematizzare la seguente successione:

- Strato 1, da 0,00 a 1,40÷3,60 m dal p.c.: limo con argilla e argilla con limo debolmente sabbiosi;
- Strato 2, da 1,40÷3,60 m a (almeno) 10,00 m dal p.c.: argilla con limo.

11.2. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni presenti nel volume significativo e definizione del modello geotecnico di sottosuolo

11.2.1. Aspetti generali

Secondo l'EuroCodice 7 (EC7), il valore caratteristico è il *valore al quale è associata una prefissata probabilità di non superamento*, per una serie teoricamente illimitata di valori. Significa, quindi, che solo una percentuale di valori, pari alla probabilità prefissata, risulterà inferiore al valore caratteristico. Con riferimento all'EC7, il valore *soglia* di probabilità di non superamento è il 5% (5° percentile o frattile).

Nelle NTC 2018 per valore caratteristico di un parametro s'intende *una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato (§ 6.2.2. del D.M. 17 gennaio 2018 e del § C6.2.2 della Circolare n. 7/2019)*. Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire a una scelta corretta dei valori caratteristici appare giustificato, secondo la Circolare, il riferimento a valori prossimi ai *valori medi* quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno (come nel caso di fondazioni superficiali, fondazioni su pali relativamente alla resistenza laterale, verifiche di stabilità, opere di contenimento, di

scatolari, di paramenti in terre rinforzate associati a rilevati stradali), mentre valori prossimi ai *valori minimi* dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno (come nel caso di fondazioni su pali relativamente alla resistenza di punta).

Per il progetto in questione, per il quale si possono prevedere compensazioni sia stratigrafiche che strutturali, le NTC indicano l'assunzione, come già accennato, di valori caratteristici prossimi al *valore medio* dei parametri geotecnici (unica deroga a questa assunzione è data dall'adozione di valori caratteristici prossimi ai *minimi* (riferimento al valore del 5° percentile) dei parametri geotecnici per quelle condizioni di rottura localizzata).

11.2.2. Modello geotecnico

Con riferimento agli strati descritti al paragrafo § 11.1, in funzione delle opere in progetto e del relativo volume significativo, si riportano nella tabella 13 i valori caratteristici dei parametri geotecnici.

da [m p.c.]	a [m p.c.]	Strato geotecnico	c [kPa]	f [°]	c _u [kPa]	γ [kN/m ³]	Ed ⁶ [kPa]
0,00	1,40÷3,60	1	10,6	21,5	62,96	19,33	5.883,99
1,40÷3,60	(10,00)	2	15,8	19,13	72,58	19,56	10.885,38

Tabella 13 - Valori caratteristici per l'area di intervento.

Nel dettaglio i valori caratteristici sono stati ottenuti nel seguente modo:

- peso di volume γ dalla media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni disponibili;
- coesione non drenata c_u dello strato 1 dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove triassiali;
- coesione non drenata c_u dello strato 2 dall'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche

⁶ Per quanto riguarda il modulo edometrico il valore caratteristico riportato nella tabella è rappresentativo del singolo strato individuato per il modello geologico e geotecnico. Sarà cura del progettista geotecnico attribuire eventuali ulteriori valori del modulo edometrico a strati di spessore inferiore per il calcolo dei cedimenti.

- angolo di attrito interno f e coesione drenata c' dello strato 1 dalla prova di taglio diretto eseguita sul campione S88-C1;
- angolo di attrito interno f e coesione drenata c' dello strato 2 dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove triassiali;
- modulo edometrico E_d dall'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove edometriche;

11.2.2.1. Considerazioni sui terreni coesivi superficiali

L'analisi delle prove di laboratorio (prove edometriche) e delle prove in sito (prove penetrometriche statiche CPT, prove penetrometriche statiche con piezocono CPTU, prove dilatometriche DT) ha mostrato la presenza di terreni superficiali con un elevato grado di sovraconsolidazione (OCR), concentrata soprattutto nei primi due metri di profondità dal piano campagna e dovuta a processi di essiccamento per temporanea emersione di sedimenti in ambiente di deposizione lacustre-palustre. Tali processi sono annoverati in letteratura fra le cause di preconsolidazione di terreni, fenomeno diverso da quello meccanico dovuto a precarico, con successiva erosione.

Queste evidenze di sovraconsolidazione, che nell'area di progetto assume valori molto variabili sia in senso orizzontale che verticale, sono state registrate anche in corrispondenza di aree limitrofe a quella in oggetto in terreni coesivi del tutto analoghi (argille limose e limi argillosi) e sono documentate sia nelle zone interessate dalla realizzazione delle altre opere previste dal project review del Piano di Sviluppo Aeroportuale 2035 (in particolare nell'area di progetto della nuova pista, degli argini del nuovo tracciato del Fosso Reale, della duna antirumore a protezione del Polo Scientifico) che, ad esempio, presso l'area di Case Passerini per la progettazione del nuovo impianto di recupero energia da incenerimento rifiuti non pericolosi, presso l'area di Peretola-Castello (in G. Vannucchi "Analisi statistica e sperimentale della compressibilità dei terreni di fondazione nell'area di Peretola-Castello", Rivista Italiana di geotecnica, A.G.I., 1987), presso l'area del Polo Scientifico Universitario di Sesto Fiorentino.

11.3. Liquefazione

Ai sensi del § 7.11.3.4 del D.M. 17 gennaio 2018, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti condizioni:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0.1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (*Cone Penetration Test – C.P.T.*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1a e b delle NTC 2018.

§ 7.11.3.4.2 DM 17-01-18	Criteri di esclusione	Valore	Verifica Liquefazione	Note
1	Accelerazione max attesa al p.c. < 0.1 g	0,117 g (SLV)	SI	Vedi § 9.2.4.2
2	Prof. falda > 15 m	>10,0 m	SI	Informazioni da sondaggi
3	$(N_1)_{60} > 30$ $q_{c1N} > 180$	-	-	-
4	Distribuzione granulometrica	Allegato A	NO	Distribuzioni prevalentemente al di fuori dei limiti

Tabella 14- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.

12. Modellazione geologica, geotecnica e liquefazione (Nuovo Canale Lupaia Giunchi e Collettore per scarico Cassa Orientale)

12.1. Modello geologico del sottosuolo

Premesso che l'intervallo superficiale costituito dai primi 2÷3 di terreno presenta frequenti eteropie/variazioni litologiche sia in senso verticale che orizzontale, il terreno in posto al di sotto dell'area in progetto può essere suddiviso, ai fini della modellazione geologica, in 4 strati individuati mediante l'analisi litologica e stratigrafica, integrando i dati dei sondaggi con le analisi granulometriche e le prove penetrometriche (in particolare sulla base delle caratteristiche geomeccaniche evidenziate dalle CPT).

Dall'alto verso il basso, è possibile schematizzare la seguente successione:

- 0,00÷1,00 m dal p.c. (valori mediani): intervallo superficiale eterogeneo, con frequenti eteropie verticali e laterali, costituito da limo con argilla, spesso debolmente sabbioso o sabbioso, e argilla con limo, frequentemente associata a una componente sabbiosa più o meno cospicua; talvolta è presente una componente debolmente ghiaiosa nei litotipi citati; abbastanza frequente anche la presenza di sottili livelli di sabbia limosa. La frazione prevalentemente coesiva ha un grado di consistenza medio-alto, la frazione prevalentemente granulare si presenta molto addensata;
- 1,00÷3,40 m dal p.c. (valori mediani): intervallo costituito dagli stessi litotipi di quello soprastante, ma da cui in genere si differenzia per avere caratteristiche geomeccaniche più scadenti (es. resistenza di punta penetrometrica, modulo edometrico). La frazione prevalentemente coesiva ha un grado di consistenza medio-basso, la frazione prevalentemente granulare ha, in modo simile, un grado di addensamento medio-basso;
- 3,40÷4,90 m dal p.c. (valori mediani): intervallo composto prevalentemente da argilla con limo e limo con argilla, subordinatamente da argilla con limo (e limo con argilla) debolmente sabbiosa e talvolta debolmente ghiaiosa. La frazione prevalentemente coesiva mostra una consistenza media e, con la profondità, medio-elevata; la frazione prevalentemente granulare presenta un addensamento medio-basso;
- 4,90÷6,20 m dal p.c. (almeno fino a 15,0÷20 m dal p.c.) (valori mediani): argilla con limo e argilla limosa, limo con argilla e limo argilloso, meno frequentemente argilla con limo (e limo con argilla) debolmente sabbiosa. La frazione prevalentemente coesiva mostra una consistenza medio-elevata, talvolta elevata; la frazione prevalentemente granulare presenta un addensamento medio-basso. Questa successione si spinge ininterrotta almeno fino alla profondità di circa 20 m dal p.c., con i primi rinvenimenti nell'area di interesse di intervalli di ghiaia e sabbia in matrice limoso-argillosa.

12.2. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni presenti nel volume significativo e definizione del modello geotecnico di sottosuolo

12.2.1. Aspetti generali

Secondo l'EuroCodice 7 (EC7), il valore caratteristico è il *valore al quale è associata una prefissata probabilità di non superamento*, per una serie teoricamente illimitata di valori. Significa, quindi, che solo una percentuale di valori, pari alla probabilità prefissata, risulterà

inferiore al valore caratteristico. Con riferimento all'EC7, il valore *soglia* di probabilità di non superamento è il 5% (5° percentile o frattile). Nelle NTC 2018 per valore caratteristico di un parametro s'intende *una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato* (§ 6.2.2. del D.M. 17 gennaio 2018 e del § C6.2.2 della Circolare n. 7/2019). Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire a una scelta corretta dei valori caratteristici appare giustificato, secondo la Circolare, il riferimento a valori prossimi ai *valori medi* quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno (come nel caso di fondazioni superficiali, fondazioni su pali relativamente alla resistenza laterale, verifiche di stabilità, opere di contenimento, di scollari, di paramenti in terre rinforzate associati a rilevati stradali), mentre valori prossimi ai *valori minimi* dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno (come nel caso di fondazioni su pali relativamente alla resistenza di punta). Per il progetto in questione, per il quale si possono prevedere compensazioni sia stratigrafiche che strutturali, le NTC indicano l'assunzione, come già accennato, di valori caratteristici prossimi al *valore medio* dei parametri geotecnici (unica deroga a questa assunzione è data dall'adozione di valori caratteristici prossimi ai *minimi* (riferimento al valore del 5° percentile) dei parametri geotecnici per quelle condizioni di rottura localizzata).

12.2.2. Modello geotecnico

12.2.2.1. Modello geotecnico

Con riferimento agli strati descritti al paragrafo § 12.1, in funzione dell'opera in progetto e del volume significativo, si riportano nella tabella 15 i valori caratteristici dei parametri geotecnici.

da (valore mediano) [m p.c.]	a (valore mediano) [m p.c.]	strato geotecnico	c' [kPa]	f [°]	c _u [kPa]	γ [kN/m ³]	Ed [kPa]
0,00	1	1	4,48	22,39	70,90	19,40	4.097,31
1	3,4	2	10,02	19,20	82	19,60	5.432,03
3,4	4,9	3	7,55	22,06	105,6	19,30	9.753,10
4,9	6,20 (15,0)	4	17,82	18,50	148,5	19,70	13.206,83

Tabella 15 - Valori caratteristici per l'area di intervento relativamente alla pista.

Nel dettaglio i valori caratteristici sono stati ottenuti nel seguente modo:

- peso di volume γ , quale valore della mediana dei risultati della relativa prova di laboratorio eseguita sui provini dei campioni indisturbati;
- angolo di attrito interno f e coesione drenata c' , tramite l'elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio;
- resistenza non drenata c_u , tramite l'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche, con i risultati oggetto di confronto con quelli ottenuti tramite l'elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio;
- modulo edometrico E_d tramite l'elaborazione statistica delle prove penetrometriche statiche, con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove edometriche.

12.3. Liquefazione

Ai sensi del § 7.11.3.4 del D.M. 17 gennaio 2018, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti condizioni:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0.1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (*Cone Penetration Test – C.P.T.*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1a e b delle NTC 2018.

§ 7.11.3.4.2 DM 17-01-18	Criteri di esclusione	Valore	Verifica Liquefazione	Note
1	Accelerazione max attesa al p.c. < 0.1 g	> 0.1	SI	Vedi § 9.2.4.3
2	Prof. falda > 15 m	>10,0 m	SI	Informazioni da sondaggi
3	$(N_1)_{60} > 30$ $q_{C_{1N}} > 180$	-	-	-
4	Distribuzione granulometrica	Allegato A	NO	Distribuzioni prevalentemente al di fuori dei limiti

Tabella 16- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.

13. Modellazione geologica, geotecnica e liquefazione (Collettore sotto la pista)

13.1. Modello geologico del sottosuolo

Seppure nello spessore di terreno limitato ai primi 2÷3 m esistono frequenti eteropie/variazioni litologiche sia verticali che orizzontali, il sottosuolo dell'area in oggetto può essere suddiviso, ai fini della modellazione geologica, in tre strati individuati mediante l'analisi litologica e stratigrafica, integrando i dati dei sondaggi con le analisi granulometriche e le prove penetrometriche (in particolare sulla base delle caratteristiche geomeccaniche evidenziate dalle CPT). Dall'alto verso il basso è possibile schematizzare la seguente successione:

- da 0,00 a 0,60÷1,00 m dal p.c.: limo con argilla debolmente sabbioso o sabbioso, mediamente consistente la frazione coesiva, da addensata a molto addensata la frazione granulare;
- da 0,60÷1,00 m a 1,60÷4,00 dal p.c.: limo con argilla debolmente sabbioso e, subordinatamente, argilla con limo debolmente ghiaiosa, da scarsamente consistente a mediamente consistente (addensata) la frazione coesiva (granulare);
- da 1,60÷4,00 m (almeno) 10,00 m dal p.c.: argilla con limo, a tratti debolmente sabbiosa, mediamente consistenti (mediamente addensata la frazione granulare).

13.2. Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni presenti nel volume significativo e definizione del modello geotecnico di sottosuolo

13.2.1. Aspetti generali

Secondo l'EuroCodice 7 (EC7), il valore caratteristico è il *valore al quale è associata una prefissata probabilità di non superamento*, per una serie teoricamente illimitata di valori. Significa, quindi, che solo una percentuale di valori, pari alla probabilità prefissata, risulterà inferiore al valore caratteristico. Con riferimento all'EC7, il valore *soglia* di probabilità di non superamento è il 5% (5° percentile o frattile).

Nelle NTC 2018 per valore caratteristico di un parametro s'intende *una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato* (§ 6.2.2. del D.M. 17 gennaio 2018 e del § C6.2.2 della Circolare n. 7/2019). Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire a una scelta corretta dei valori caratteristici appare giustificato, secondo la Circolare, il riferimento a valori prossimi ai *valori medi* quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno (come nel caso di fondazioni superficiali, fondazioni su pali relativamente alla resistenza laterale, verifiche di stabilità, opere di contenimento, di scatolari, di paramenti in terre rinforzate associati a rilevati stradali), mentre valori prossimi ai *valori minimi* dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno (come nel caso di fondazioni su pali relativamente alla resistenza di punta).

Per il progetto in questione, per il quale si possono prevedere compensazioni sia stratigrafiche che strutturali, le NTC indicano l'assunzione, come già accennato, di valori caratteristici prossimi al *valore medio* dei parametri geotecnici (unica deroga a questa assunzione è data dall'adozione di valori caratteristici prossimi ai *minimi* (riferimento al valore del 5° percentile) dei parametri geotecnici per quelle condizioni di rottura localizzata).

13.2.2. Modello geotecnico

13.2.2.1. Modello geotecnico

Con riferimento agli strati descritti al paragrafo § 13.1, in funzione dell'opera in progetto e del volume significativo, si riportano nella tabella 17 i valori caratteristici dei parametri geotecnici.

da [m p.c.]	a [m p.c.]	Strato geotecnico	c' [kPa]	f [°]	c _u [kPa]	γ [kN/m ³]	Ed ⁷ [kPa]
0,00	0,60÷1,00	1	9,98	26,08	79,40	19,15	4.560,09
0,60÷1,00	1,60÷4,00	2	7,4	17,82	50,14	19,20	5.305,40
1,60÷4,00	(10,00)	3	16,81	22,59	83,58	19,39	12.650,58

Tabella 17 - Valori caratteristici per l'area di intervento.

Nel dettaglio i valori caratteristici sono stati ottenuti nel seguente modo:

- peso di volume γ dalla media tra le determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni disponibili;
- coesione drenata c' dello strato 1 e dello strato 3 dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio;
- coesione drenata c' dello strato 2 dalla prova di taglio diretto sul campione S93-CI1;
- angolo di attrito interno f dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove di laboratorio;
- coesione non drenata c_u dello strato 1 dalla prova di compressione semplice sul campione S28-CI1;
- coesione non drenata c_u degli strati 2 e 3 dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove penetrometriche statiche;
- modulo edometrico Ed dall'elaborazione statistica dei risultati delle prove penetrometriche statiche, con approccio cautelativo, e controllo dei risultati delle prove edometriche.

13.3. Liquefazione

Ai sensi del § 7.11.3.4 del D.M. 17 gennaio 2018, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti condizioni:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0.1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove

⁷ Per quanto riguarda il modulo edometrico il valore caratteristico riportato nella tabella è rappresentativo del singolo strato individuato per il modello geologico e geotecnico. Sarà cura del progettista geotecnico attribuire eventuali ulteriori valori del modulo edometrico a strati di spessore inferiore per il calcolo dei cedimenti.

penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (*Cone Penetration Test – C.P.T.*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;

4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1a e b delle NTC 2018.

§ 7.11.3.4.2 DM 17-01-18	Criteri di esclusione	Valore	Verifica Liquefazione	Note
1	Accelerazione max attesa al p.c. < 0.1 g	> 0.1	SI	Vedi § 9.2.4.3
2	Prof. falda > 15 m	>10,0 m	SI	Informazioni da sondaggi
3	$(N_1)_{60} > 30$ $q_{c1N} > 180$	-	-	-
4	Distribuzione granulometrica	Allegato A	NO	Distribuzioni prevalentemente al di fuori dei limiti

Tabella 18- Condizioni di esclusione della verifica a liquefazione.

14. Terre e rocce da scavo

Per la gestione delle terre e rocce da scavo si rimanda allo specifico Piano di Utilizzo delle Terre (PUT).

15. Indicazioni relative alla realizzazione dei lavori

15.1. Indicazioni inerenti la gestione delle acque di aggotamento

In base a quanto riportato nel § 4.3 i primi metri di terreno, interessati dagli scavi delle opere di progetto sono caratterizzati da totale assenza di falda o dalla presenza di sporadici orizzonti idrici, legati alla ritenzione idrica delle argille, non produttivi e a carattere del tutto saltuario.

Si può prevedere quindi la necessità di aggotare acque soltanto se con lavori di scavo aperti nelle stagioni piovose e comunque per portate estremamente limitate.

A causa delle specifiche caratteristiche litologiche dei terreni affioranti nell'area, i quali risultano dotati di una permeabilità bassa o molto bassa che limita molto o addirittura impedisce l'infiltrazione nel sottosuolo, in occasione dei periodi di pioggia possono formarsi dei ristagni di acqua in superficie che possono perdurare anche per molti giorni.

15.2. Indicazioni sulla necessità di opere provvisorie e loro tipologia

Sia per i fronti di scavo che per le scarpate di rinterro che si genereranno in corso d'opera non si ravvede la necessità di ricorrere a opere provvisorie di sostegno modellando i fronti di scavo con pendenze 2/1 e le scarpate con pendenze 1/1.

15.3. Indicazione sulla tutela dei suoli interessati dalle aree di cantiere

La sostanziale bassa permeabilità dei suoli che si troveranno sul fondo degli scavi è una naturale garanzia di tutela per i suoli e per le acque sotterranee bel più profonde dei fondo scavi.

Resta naturalmente doveroso assumere da parte della Direzione dei Lavori tutti gli accorgimenti tecnici necessari alla protezione del terreno di fondo scavo da possibili fenomeni di inquinamento causati dal passaggio dei mezzi d'opera.

15.4. Indicazione degli interventi di ripristino delle aree a fine cantiere

Non si ravvisano interventi di ripristino particolari a eccezione delle normali attività di pulizia e smaltimento dei rifiuti prodotti dal cantiere.

16. Conclusioni

Lo studio geologico effettuato nell'area in sono previste le opere idrauliche esterne al sedime aeroportuale, non ha evidenziato la presenza di aspetti geologici, geomorfologici, idrogeologici e sismici contrastanti o limitanti la fattibilità dell'intervento. Per quanto riguarda l'esame delle problematiche idrauliche si rimanda agli altri elaborati progettuali.

Viste le caratteristiche di progetto, quelle geologiche e geotecniche e i risultati delle indagini eseguite nel sito di intervento (*Campagna di indagini geognostiche per la realizzazione della nuova pista e delle opere accessorie dell'Aeroporto Internazionale di Firenze Amerigo Vespucci, 2015, 2017*) è stato elaborato il modello geologico e geotecnico del sottosuolo indicando i valori caratteristici dei parametri geotecnici da adottare per ciascuna delle principali opere previste.

A partire dalla categoria di sottosuolo identificata attraverso indagini geofisiche di tipo MASW e HVSR (categoria di sottosuolo C per tutte le opere idrauliche, eccetto il collettore fognario che sottopassa la pista che ricade in categoria B) e in base a vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento ipotizzati, sono stati forniti i parametri dell'azione sismica locale (§ 9.2.4).

Firenze, marzo 2024

dr. geol. Fabio Picchi

dr. geol. Michele Sani

17. Bibliografia

Per redigere i capitoli 3 e 4 sono state consultate e utilizzate le seguenti pubblicazioni:

- AA.VV. (1982) – *Carta strutturale dell'Appennino Settentrionale in scala 1:250.000*. Note illustrative C.N.R., Prog. Fin. Geod., 429, 203 pp.
- Abbate E., Bortolotti V., Passerini P. & Sagri M. (1970) – *Introduction to the geology of the Northern Apennines*. *Sedimentary Geology* 4, 3-4, 207-249.
- Autorità di Bacino del Fiume Arno (2010) – *Piano di Bacino – Stralcio bilancio idrico*.
- Bartolini C. & Pranzini G. (1981) – *Plio-Quaternary evolution of the Arno Basin drainage*. *Zeit. Geomorph. N.F., Suppl. Bdo* 40, 77-91.
- Boccaletti M., Corti G., Gargini A., Gasperini P., Piccardi L., Pranzini G., Vannucci G., Moratti G. (1998) – *Geologia urbana di Firenze*. *Geologia dell'ambiente*, anno VI, n.4/98, 9-20.
- Boccaletti M., Moratti G. & Pranzini G. (1997) – *Geologia del bacino di Firenze*, in *Geologia Urbana di Firenze*, Atti del convegno "Geologia delle grandi aree urbane", Bologna, 4/5 novembre 1997, vol. A, 2-9.
- Briganti R., Ciufegni S., Coli M., Polimeni S. & Pranzini G. (2003) – *Underground Florence: Plio-Quaternary evolution of the Florence area*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 122, 1-11.
- Canuti P., Pranzini G. & Sestini G. (1966) – *Provenienza ed ambiente di sedimentazione dei ciottoli del Pliocene di San Casciano (Firenze)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 5, 340-364.
- Capecchi F., Guazzone G. & Pranzini G. (1976a) – *Il bacino lacustre di Firenze - Prato - Pistoia. Geologia del sottosuolo e ricostruzione evolutiva*. *Boll. Soc. Geol. It.*, XCVI (4), 1975, 637-660.
- Capecchi F., Guazzone G. & Pranzini G. (1976b) – *Ricerche geologiche e idrogeologiche nel sottosuolo della pianura di Firenze*. *Boll. Soc. Geol. It.*, XCVI (4), 1975, 661-692.
- Capecchi F., Guazzone G. & Pranzini G. (1976c) – *Gli acquiferi profondi fra Firenze e Pistoia*. *Boll. Ingegn. Prov. Firenze*, 1975, (12), 1-3.
- Coli M., Pini G., Rubellini P. & Agostini A. (2006) – *Firenze - Carta litotecnica*. Ricerca cofinanziata dal Comune di Firenze e Università di Firenze Dip.to Scienze della Terra. SELCA Firenze.
- Coli M., Pranzini G. & Rubellini P. (2012) – *Idrogeologia dell'area fiorentina*. Comune di Firenze e Università di Firenze Dip.to Scienze della Terra.
- Coli M. & Rubellini P. (2007) – *Note di geologia fiorentina*. SELCA 2007.
- Gargini A. & Pranzini G. (1994) – *Map of protection against pollution of aquifers in the Middle Valdarno (Florence-Prato-Pistoia plain)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 48, 923-928.
- Gori P. (1970) – *Osservazioni idrogeologiche e sedimentologiche nell'area compresa fra Campi Bisenzio, Scandicci e Lastra a Signa*. Tesi di laurea inedita, Istituto di Geologia di Firenze.
- Grigioni A. (2012) – *Relazione geologica e idrogeologica. Impianto di recupero energia da incenerimento di rifiuti non pericolosi loc. Case Passerini, Sesto Fiorentino (Firenze)*, 1-158.
- Guazzone G. (1971) – *Ricerca sulle falde acquifere profonde fra Firenze e Pistoia. Parte I. Indagine geologica*. Quaderni dell'Istituto di ricerca sulle acque, 6, 42-53.
- Pandeli E. (2008) – *La pianura di Firenze-Prato-Pistoia nel quadro dell'evoluzione geologica dell'Appennino Settentrionale*. In: *Un piano per la Piana: idee e progetti per un parco*.

Atti del convegno 9-10 maggio 2008 – Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino, Università di Firenze, 1-16.

Pranzini G. (1994) – *Water resources of the Arno Basin*. Mem. Soc. Geol. It., 48, 785-794.

PRANZINI G. (2008) – *Idrogeologia della piana fiorentina*. In: *Un piano per la Piana: idee e progetti per un parco*. Atti del convegno 9-10 maggio 2008 – Polo Scientifico e Tecnologico di Sesto Fiorentino, Università di Firenze, 1-15.

* * *